



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Mihkel Keisk

**Temperatuuriregulaator lignotselluloosse biomassi
eeltöötlussüsteemile**

Temperature regulator for lignocellulosic biomass pretreatment
system

Magistritöö
Tootmistehnika õppekava

Juhendaja: nooremteadur Vahur Rooni
Juhendaja: nooremteadur Erkki Jõgi

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Mihkel Keisk		Õppekava: Tootmistehnika	
Pealkiri: Temperatuuriregulaator lignotselluloosse biomassi eeltöötlussüsteemile			
Lehekülgi: 53	Jooniseid: 24	Tabeleid: 5	Lisasid: 8
Õppetool: Biomajandustehnoloogiaste õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika			
ETIS-e teaduseriala: 4.14. Tootmistehnika ja tootmisjuhtimine			
CERC S-i kood: T125 Automatiseerimine			
Juhendajad: nooremteadur Vahur Rooni, nooremteadur Erkki Jõgi			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2018			
<p>Keerulisemates juhtimisprotsessides, kus esineb mõõteväärtuse hilistumist, kasutatakse süsteemide juhtimiseks alluvkontuuriga regulaatorit. Hilistumine võib olla põhjustatud näiteks soojustakistusest vedeliku kuumutamisel. Alluvkontuuriga regulaatori tööpõhimõtteks on protsessi alguses juhtida süsteemi kiirelt reageeriva protsessiväärtuse abil, kuni aeglaselt reageeriva väärtuse, alluvkontuuri juhitavaks muutumisel. Magistritöö eesmärgiks on projekteerida ja ehitada temperatuuriregulaator lämmastiklõhkamiseseadmele. Regulaator peab hoidma sätetemperatuuri reaktorisiseselt biomassi ja vee segul inkubatsiooniaja kestel. Töös kirjeldatakse regulaatori projekteerimist, koostamist, programmeerimist ning töötamist. Katselises osas viiakse läbi ehitatud seadme häälestamine, mille käigus muudetakse <i>PID</i> regulaatori võimendustegurite väärtuseid vastavalt siirdeprotsessigraafikute muutustele. Pärast sobivate võimendustegurite leidmist katsetatakse antud parameetreid ka teistel temperatuuridel.</p> <p>Käesolevas magistritöös projekteeriti ja ehitati kaskaadjuhtimisega temperatuuriregulaator biomassi eeltöötlussüsteemile. Seadmele koostati elektroonika komponentidega trükkplaadid ning <i>ABS</i> materjalist 3D prinditud korpus. Koostatud regulaatori häälestamine viidi läbi edukalt nelja katsega.</p>			
Märksõnad: lämmastiklõhkamise seade, alluvkontuur, kaskaadjuhtimine, Arduino			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Master's Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Author: Mihkel Keisk		Curriculum: Production engineering	
Title: Temperature regulator for lignocellulosic biomass pretreatment system			
Pages: 53	Figures: 24	Tables: 5	Appendixes: 8
Chair: Biosystems engineering			
Field of research:			
ETIS category: 4. Natural Sciences and Engineering			
ETIS speciality: 4.14. Industrial Engineering and Managment			
CERC'S code: T125 - Automation, robotics, control engineering			
Supervisors:early stage researcher Vahur Rooni, early stage researcher Erkki Jõgi			
Place and date: Tartu 2018			
<p>In complex process control systems where time delay influences a controller's performance, a cascade controller is used. In cascade control a process is controlled by two or more process variables where one influences the others. One of the process variables affects the other and is used to control the system until the slower variable becomes controllable.</p> <p>The aim of this MA thesis was to engineer and build a temperature regulator for a nitrogen explosion system which is used in bio-ethanol pre-production. The engineered device consists of printed circuitboards, 3D printed body and an <i>LCD</i>. In the experimental stage several tests were conducted with the built controller in order to find optimal gain values for the <i>PID</i> cascade controller. The controller was successfully tuned within four tests.</p>			
Keywords: Nitrogen explosion, inner loop, cascade controller, Arduino			

SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID	5
SISSEJUHATUS	7
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	9
1.1. Lämmastiklõhkamise seade	9
1.2. Lämmastiklõhkamise seadme soojuslevi	10
1.3. Süsteemi automaatjuhtimine	13
1.3.1. Automaatjuhtimise alused	13
1.3.2. Regulaatorid	14
1.3.3. Pidevatoimelised regulaatorid	15
1.3.4. Alluvkontuuriga juhtimine	18
1.4. Termo-elektrilised temperatuuriandurid	19
1.5. Vahelduvpinge reguleerimine sümistoriga	20
2. LÄHTEÜLESANDE PÜSTITAMINE	22
2.1. Nõuded seadmele	22
2.2. Turu-uuring	23
2.3. Küttesüsteemi ülesehitus	23
2.4. Juhtimisalgoritmi kirjeldus	25
3. SEADME PROJEKTEERIMINE	27
3.1. Regulaatori täituri juhtimine	27
3.2. Elektroonika osa projekteerimine	30
3.2.1. Mikrokontrolleri valik	30
3.2.2. Vahelduvvooluahel	31
3.2.3. Alalisvooluahel	33
3.3. Jahutusradiaatorite soojustakistuse arvutus	35
3.4. Seadme koostamine	37
3.5. Korpuse projekteerimine	39
3.6. Mikrokontrolleri programmeerimine	40
4. SEADME KATSETAMINE	42
4.1. Metoodika	42
4.2. Katsete tulemused	43
KOKKUVÕTE	49
KASUTATUD KIRJANDUS	51
LISAD	53
Lisa 1. Regulaatori skeemid	54
Lisa 2. Lülitimooduli skeemid	61
Lisa 3. Analoo-digitaalmuunduri elektriskeem	66
Lisa 4. Regulaatori kasutusjuhend	69
Lisa 5. Korpuse detailjoonised ja koostejoonis	84
Lisa 6. Programmikood	88
Lisa 7. Kuumutussüsteemi koostejoonis	99
Lisa 8. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	101

TÄHISED JA LÜHENDID

<i>A</i>	–	pindala, m ² ;
<i>ABS</i>	–	akrüülnitriil-butadieen-stüreen;
<i>CAM</i>	–	arvutipõhine tootmine;
<i>CNC</i>	–	arvprogrammjuhtimine;
<i>D-lüli</i>	–	diferentseeriv lüli;
<i>e</i>	–	reguleerimisviga;
<i>EEPROM</i>	–	elektriliselt kustutatav kirjutuskaitstud püsimälu;
<i>h</i>	–	konvektiivne soojusülekandevast, $\frac{W}{m^2 \times K}$;
<i>I/O</i>	–	sisend, väljund;
<i>I²C</i>	–	jadasiin;
<i>I_{max}</i>	–	maksimaalne vool, A;
<i>I_{LED}</i>	–	valgusdiodi voolutugevus, A;
<i>I-lüli</i>	–	integreeriv lüli;
<i>IDE</i>	–	integreeritud programmeerimiskeskond;
<i>k</i>	–	materjali soojusjuhtivustegur, $\frac{W}{m \times K}$;
<i>k_d</i>	–	diferentseeriv võimendustegur;
<i>k_i</i>	–	integreeriv võimendustegur;
<i>k_p</i>	–	proportsionaalne võimendustegur;
<i>LCD</i>	–	vedelkristallkuvar;
<i>NTC</i>	–	negatiivse tunnusoonega termistor;
<i>P-lüli</i>	–	proportsionaalne lüli;
<i>P_D</i>	–	soojuslikult eralduv võimsus W;
<i>P_{LM7805}</i>	–	lubatav soojuslikult eralduv võimsus, W;
<i>P_{arvutuslik}</i>	–	arvutuslik soojuseraldus, W;
<i>PID</i>	–	proportsionaalne, integraalne, diferentsiaalne;
<i>PTC</i>	–	positiivse tunnusoonega termistor;
<i>PWM</i>	–	pulsilaiusmodulatsioon;
<i>Q_{kond.}</i>	–	soojusjuhtivuslik soojusvoog, $\frac{W}{m^2}$;
<i>Q_{konv.}</i>	–	konvektiivne soojusvoog, $\frac{W}{m^2}$;
<i>R</i>	–	takistus, Ω;
<i>RTD</i>	–	takistustermoandur;
<i>SPI</i>	–	neljajuhtmeline järjestiksiin;
<i>t</i>	–	aeg, s;

T	– temperatuur, °C;
T_1	– küttekeha temperatuur, °C;
T_2	– reaktorisene temperatuur, °C;
T_A	– väliskeskkonna temperatuur, °C;
T_J	– sümistori siirde maksimaalne töötemperatuur, °C;
T_S	– teoreetiline vedeliku külpinna temperatuur, °C;
T_∞	– teoreetiline vedeliku temperatuur, võimalikult kaugel külpinna, °C.
u	– juhttoime;
U	– pinge, pingelang, V;
U_I	– sisendpinge V;
U_{LED}	– valgusdiodi pingelang, V;
U_0	– väljundpinge, V;
U_R	– takisti pingelang, V;
x	– isolatsiooni paksus, m;
y	– protsessi väljundväärtus;
y_{sp}	– seadeväärtus, sätevärtus;
ΔT	– temperatuurierinevus, °C;
τ	– integreerimisaeg, s.
θ_{JA}	– sümistori siirde ja keskkonna vaheline soojusakistus, $\frac{K}{W}$;
θ_{JC}	– soojusakistus siirdelt seadme korpusesse, $\frac{K}{W}$;
θ_{SA}	– jahutusradiaatori ja keskkonna vaheline soojusakistus, $\frac{K}{W}$;

SISSEJUHATUS

Tänapäeva tööstuses kasutatakse protsesside juhtimiseks regulaatoreid. Regulaatorid võimaldavad juhtida erinevaid parameetreid nagu temperatuur, rõhk, vooluhulk jne. Iga protsessi juhtimise eelduseks on protsessi iseloomustava protsessiväärtuse mõõtmine, mille abil arvutatakse reguleerimisviga. Esineb ka protsesse, milles ühest regulaatori seadistusest ei piisa: suure hilistumisajaga süsteemid, kus protsessiväärtuse tõusu pärsib takistus. Takistuse ületamiseks kasutatakse alluvkontuuriga juhtimist ehk kaskaadjuhtimist, kus süsteemi juhitakse protsessi alguses alternatiivse protsessiväärtusega. Alluvkontuuriga juhtimisel toimub kiirema väärtuse järgi protsessi juhtimine, kuni aeglane parameeter muutub juhitaavaks.

Eesti Maaülikoolis uuritakse teise ja kolmanda põlvkonna biokütuseid. Teise põlvkonna biokütuste toormeks on lignotselluloosne biomass, näiteks saepuru. Bioetanooli tootmisprotsessi kuulub toorme eeltöötlemine, mida võib sooritada termo-keemilisel lämmastiklõhkamise meetodil. Nimetatud meetodit kasutatakse biomassi rakustruktuuri lõhkumiseks ja see on üks osa bioetanooli tootmisprotsessist. Vaadeldavas eeltöötlussüsteemis on probleemiks biomassi kuumutamine soovitud temperatuurile. Antud süsteemi on valitud sobiv reaktorit kuumutav küttekeha, kuid regulaator põhjustab biomassi ülekuumutamist sättetemperatuurist, mille tulemusel biomass söestub.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli projekteerida ja ehitada temperatuuriregulaator biomassi eeltöötlussüsteemile. Reguleerimisprobleemi teeb keeruliseks reaktorisse paigutatava vee ja biomassi segu kuumutamise kestus. Eelnevast lähtuvalt projekteeriti antud töös PID tüüpi regulaator, mis programmeeriti töötama kaskaadjuhtimise teel, kus protsessijuhtimist teostatakse kahe termopaari abil. Seadmele programmeeriti algoritm, mis võimaldas biomassi sujuvalt kuumutada vastavalt kahele anduri näidule ning ka hoida konstantsel temperatuuril inkubatsiooniaja kestel.

Eesmärgi saavutamiseks kirjeldatakse kirjandusallikate abil soojuse levimist biomassi lämmastiklõhkamise reaktoris, regulaatori tööpõhimõtet, pidevatoimelist regulaatorit, kasutatavaid temperatuuriandureid ning süsteemi täiturseadet.

Lähteülesande püstitamisel esitatakse seadmele nõuded, kirjeldatakse seadme ülesehitust ning juhtimise algoritmi. Seadme projekteerimise osas antakse ülevaade kasutatavatest elektroonika komponentidest, korpuse projekteerimisest, programmeerimisest ning antud osa lõppeb seadme ehitamise ning koostamisega.

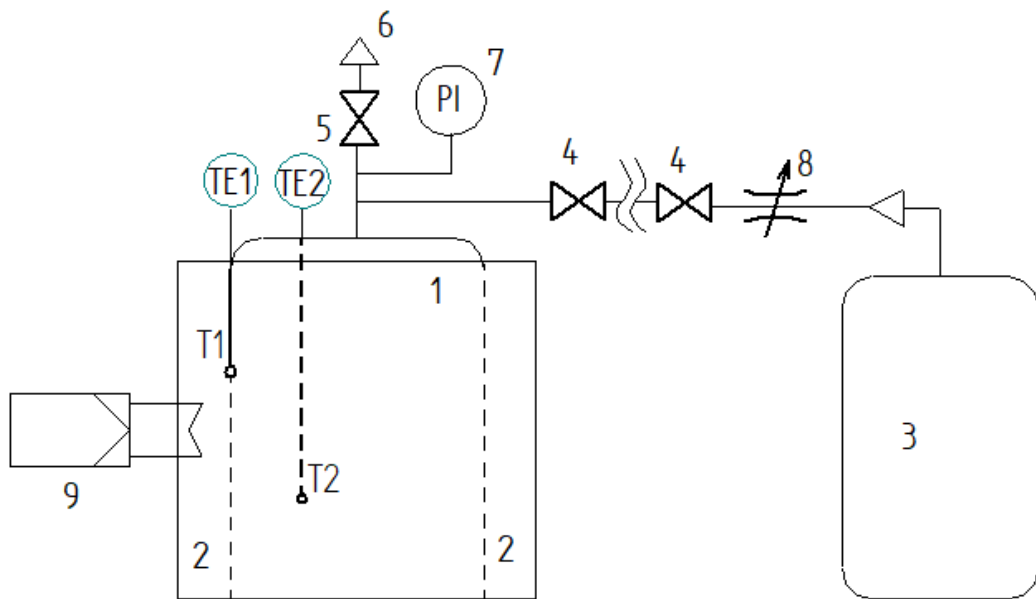
Katselises osas kirjeldatakse ehitatud regulaatori katsetamist ning häälestamise läbiviimist. Häälestamiseks teostati praktilised katsed, kus iga katse järgselt muudeti regulaatori arvutusvalemitesse sisestatavaid võimendustegurite väärtuseid. Pärast sobivate parameetrite leidmist teostati katsed erinevatel temperatuuridel, et kinnitada võimendustegurite sobivust.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Lämmastiklõhkamise seade

Lämmastiklõhkamise kontseptsioon on Eesti Maaülikoolis patendeeritud lignotselluloosse biomassi eeltöötlusmeetod. Antud protsessi eesmärgiks on eemaldada töödeldava materjali tselluloosi kiude ümbritsev komponent nt. ligniin. Eeltöötuse tulemusena on tselluloos poorsem ja paremini ligipääsetav ensüümidele [1].

Lämmastiklõhkamise läbiviimiseks asetatakse lignotselluloosne biomass koos destilleeritud veega reaktorisse 1 (joonis 1.1.). Reaktor suletakse hermeetiliselt kinnituspoltide abil ning gaasilise lämmastiku lisamiseks avatakse rõhuventiilid 4. Rõhuregulaatori abil suurendatakse rõhk süsteemis $3 \cdot 10^6$ Pa, et vältida vee keemist reaktoris ning soodustada lämmastiku läbitungimist rakkudesse. Reaktori kuumutamine toimub keraamilise küttejaki 2 abil, mis katab reaktori silinderpinna. Reaktori sees oleva biomassi hetketemperatuuri mõõdetakse reaktori päises asuvasse pesasse asetatud temperatuurianduri abil. Temperatuuri reguleeritakse regulaatori 9 abil. Reaktorit kuumutatakse, kuni saavutatakse biomassi soovitud sättetemperatuur $100\text{ °C} \dots 200\text{ °C}$ ning seda hoitakse konstantsena inkubatsiooniaja $1 \dots 60$ min vältel. Eeltöötlusprotsessi kestel lahustub süsteemi lisatud lämmastik vees ning imendub taime rakkudesse. Pärast kuumutamist lastakse reaktoril jahtuda, kuni sisetemperatuuri langemiseni 80 °C -ni. Kuulkraani 5 avamisega tekitatakse süsteemis plahvatuslik rõhulangus, mille tulemusel lämmastikuosakeste ruumalade suurenemisel lõhutakse rakustruktuur [1].



Joonis 1.1. Lämmastiklõhkamise seadme skemaatiline kujutis. 1 – reaktor; 2 –vöotkujuline keraamiline küttekeha; 3 – gaasilise lämmastiku mahuti; 4 – ventiil; 5 – rõhulangetus ventiil; 6 – gaaside väljalase atmosfääri; 7 – rõhunäidik; 8 – rõhuregulaator; 9 – kontrolleri; $T1$ – küttekeha temperatuuriandur; $T2$ – reaktorisene temperatuuriandur;

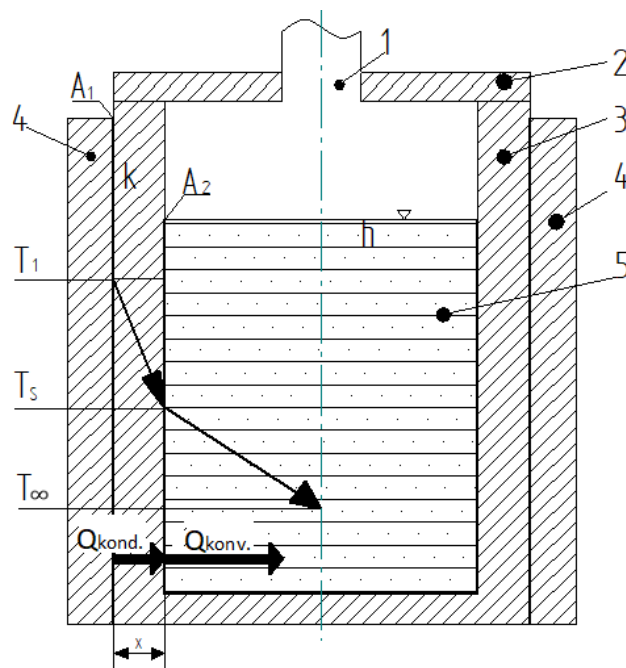
Selleks, et leida efektiivsemad eeltöötlusparameetrid tuleb katsetada erinevate sättetemperatuuride ja inkubatsiooniaegadega. Sellest tulenevalt peab kütteseadmel olema muudetavate parameetritega regulaator, mille abil saab seadistada erinevaid inkubatsiooniaegasid ja sättetemperatuure. Inkubatsiooniaja ja sättetemperatuuri peab olema võimalik salvestada kontrolleri püsimälusse. Samuti peab regulaatorit olema võimalik kasutada suurema ning väiksema süsteemi puhul, kus mahud on erinevad.

1.2. Lämmastiklõhkamise seadme soojuslevi

Termodünaamikas nimetatakse soojusvahetuseks soojusenergia ülekandumist soojemalt kehalt külmemale. Soojusvahetusprotsessi tekkimise eelduseks on süsteemi tasakaalutus, kus esineb kahe keha temperatuurierinevus. Soojuse ülekandumine võib toimuda konvektsiooni, soojuskiirguse või soojusjuhtivuse teel. Vaadeldavas süsteemis esineb küttekeha ja reaktori pindade vahel soojusjuhtivus ning biomassi vedelikus konvektsioon. Soojusjuhtivus on soojusülekande liik, milles kõrgema energiaga aineosakesed põrkavad kokku madalama energiaga osakestega, mille tulemusel tekib soojuse eraldumine. Tahketel

kehadel toimub soojusjuhtivus tulenevalt molekulide vibratsioonist materjali võres, mille tulemusel energiat transporditakse vabade elektronide poolt laiali. Konvektsioon on vedelike ja gaaside soojusülekanaliik, kus soojendatud vedeliku osakeste paisumisest ja tiheduse vähenemisest tulenevalt liiguvad aineosakesed soojemast alast külmemale ning selle tulemusena tekib vedelikus soojuse ringliikumine. Soojusvahetusprotsess lõppeb siis, kui süsteem tasakaalustatakse kehade temperatuuride võrdsustumisel. [2, 3].

Biomassi reaktorisse paigutatakse biomassi ja vee segu, mille temperatuuriks on 20 °C. Joonisel 1.2. on toodud mahuti läbilõike plaan. Reaktorit katab küttekeha, mis on köetud konstantsele temperatuurile. Reaktori sees olevat materjali ja kütteelementi isoleerib roostevabast terasest valmistatud reaktori sein. [2].



Joonis 1.2. Soojusvoog läbi reaktori seina ja reaktorisese materjali. 1 – Gaaside sisse- ja väljalaske toru; 2 – reaktori kaan; 3 – reaktor; 4 – vöotkujuline küttekeha; 5 – biomassi ja vee segu; A_1, A_2 – pindalad, millelt soojust üle kantakse; h – vedeliku konvektiivne soojusülekanalitegur; k – isolatsiooni soojusülekanalitegur; Q – soojusjuhtivuslik ja konvektiivne soojusvoog. T_1 – küttekeha temperatuur; T_s – temperatuur reaktori sisemisel pinnal; T_∞ – temperatuur vedelikus; x – seina paksus.

Soojushulga levimist kirjaldab Fourier'i seadus, mis ütleb, et soojusvoog läbi tasapinna on proportsionaalne ülekande pindalaga A ja temperatuurierinevusega ΔT , kuid

proportsionaalselt pöördvõrdeline seinapaksusega x . Kokkuvõtvalt võib öelda, et soojushulk, mis kandub kütteelemendilt reaktorisse on kahekordne, kui temperatuuride erinevust tasapindade vahel suurendada kahekordselt, kuid pöördvõrdeliselt kaks korda väiksem, kui seinapaksust kahekordistada. [2, 4]

Seega on soojusvoog läbi tasapinna võrdne temperatuurigradiendi, ülekandepindalaga ja materjali ülekandeteguriga ning on defineeritav valemi 1.1. abil [2, 3] :

$$Q_{kond.} = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} = k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} , \quad (1.1)$$

kus A on pindala, m^2 ;

k – materjali soojusjuhtivustegur $\frac{W}{m \times K}$;

ΔT – temperatuurierinevus $^{\circ}C$;

x – materjali paksus m ;

$\frac{dT}{dx}$ – temperatuurigradient.

Kütmise alguses on tegu suurema temperatuurigradiendiga. Temperatuurigradient iseloomustab kütteelemendil ja reaktoris oleva biomassi ning vee segu temperatuuride erinevust. Valemi põhjal võib järeldada, mida suurem on temperatuurierinevus seda suurem on soojusjuhtivuslik soojusvoog [2].

Soojuse levimine biomassi ja vee segus toimub tulenevalt konvektiivsest soojuslevist. Soojem vedelik on väiksema tihedusega, mille tulemusel tekivad konvektsioonikeerised, mis transpordivad soojuse vedelikus laiali [3].

Konvektiivset soojusülekannet kirjeldavaks valemiks on Newtoni jahtumisseadus [2]:

$$Q_{konv.} = h \cdot A(T_s - T_{\infty}) , \quad (1.2.)$$

kus h on konvektiivne soojusülekandegur, $\frac{W}{m^2 \times K}$;

T_s – vedeliku külgsinna temperatuur $^{\circ}C$;

T_{∞} – vedeliku temperatuur, maksimaalsel kaugusel küttepinnast $^{\circ}C$.

Erinevalt soojusjuhtivuse soojusvoo võrrandis olevast ülekandegurist k ei kirjelda soojusülekandegur h otseselt materjali või vedeliku soojustakistust või soojusjuhtivust. See on katseliselt leitav parameeter, mida iseloomustavad erinevad muutujad, nagu vedeliku liikumine anumad, vedeliku omadused ja pinna geomeetria [2].

Enne sättemperatuuri saavutamist reaktoris võib küttekeha temperatuuri reaktoriväliselt hoida kõrgemal, et ülekantav soojusvoog reaktoris oleks suurem. Suurema temperatuuri-gradiendi tõttu kiireneb protsessi käik. Tulenevalt soojusjuhtivuslikust ja konvektiivsest soojusvoost oleneb protsessi kestus materjalide soojusjuhtivustegurist. Juhtivuslik soojustegur on kindel väärtus, konvektiivne soojusjuhtivustegur leitakse katseliselt. Konvektiivset soojusvoogu mõjutavad eelkõige materjali enda omadused, näiteks soojustakistus või erisoojus, mille tõttu selle kuumutamine võtab pika aja ning süsteemis tekib selle tõttu reaktorisese ja välise temperatuuride ühtlustumisel pikk hilistumisaeg. Viimast arvestades ei saa reguleerimisprobleemi lahendada lihtsa temperatuuriregulaatoriga. Süsteemi tuleb integreerida keerukam, mitme sisendiga regulaator, mille juhtimiseks kasutatakse ka küttekeha temperatuuri väärtust.

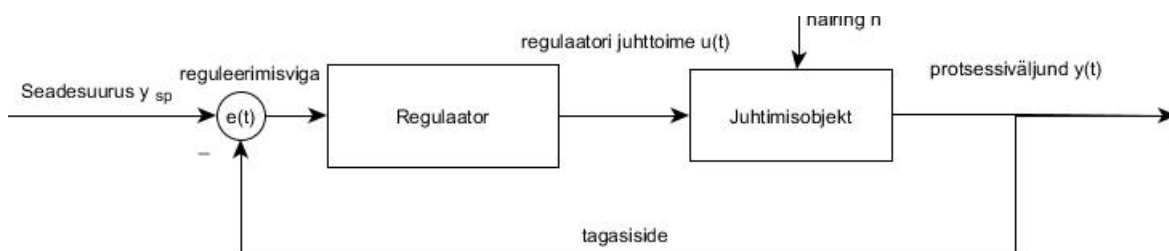
1.3. Süsteemi automaatjuhtimine

1.3.1. Automaatjuhtimise alused

Automaatjuhtimissüsteemides kasutatakse protsesside juhtimiseks kahte liiki juhtimist: tagasisidet ja tagasisidega [5]. Ilma tagasisidet juhtimine on avatud kontuuriga tegevuste jada, kus väljundmuutujal puudub protsessi kestel mõju sisendmuutujale [4]. Tagasisidet juhtimise puhul ei reguleerita temperatuuri ega saadeta temperatuuride väärtuseid regulaatorile juhttoime leidmiseks. Sättemperatuuri saavutamisel kommuteeritakse rele kontaktid ja lülitatakse küttekeha vool välja. Tagasisidet regulaatoreid kasutatakse lihtsamates seadmetes nagu veekeetjad, ahjud, jne. Seevastu tagasisidega juhtimise puhul toimub pidev protsessiväärtuste edastamine regulaatorile, mille alusel manipuleeritakse konkreetse ajaintervalli järel juhttoime väärtust. Tagasisidega juhtimine on suletud kontuuriga tegevuste jada, kus monitooritakse protsessi väljundväärtust pidevalt ja seda võrreldakse seadeväärtusega. Kõrvalekallete esinemisel muudetakse regulaatori juhttoimet [4].

Juhtimissüsteem (joonis 1.3.) koosneb kahest komponendist: regulaatorist ja juhtimisobjektist. Juhtimisobjekt on automaatikas protsess, mille parameetrit või parameetreid tahetakse kontrollida. Tagasisidega juhtimissüsteemis koosneb juhtimisobjekt: manipuleeritavast primaarsüsteemist ja mõõteseadmest, mis mõõdab protsessi

väljundväärtust. Regulaatori väljundiks ja juhtimisobjekti sisendiks on juhttoime. Juhttoime väärtuse arvutamine regulaatori poolt toimub iga ettemääratud ajaintervalli järel. Juhttoime väärtuseks on 0...100%. Täituriteks võivad olla näiteks elektriliselt juhitud solenoidklapid, mootorid või pooljuhtreled. [5].



Joonis 1.3. Juhtimissüsteemi plokkskeem [5].

Juhtimisobjekti väljundiks nimetatakse väljundsuurust, mis on mõõdetav suurus protsessis. Soojusvahetusprotsessis on mõõdetavaks väärtuseks temperatuur. Tagasisidega juhtimissüsteemi suletud ahela viimase funktsioonina toimub väljundväärtuse mõõtmine ja tagasi saatmine regulaatorile. Protsessi soovitud väärtust kutsutakse seadesuuruseks või sätteväärtuseks. Regulaatoris lahutatakse sätteväärtusest väljundväärtus ja saadakse juhtimise erinevusmuutuja veasignaal ehk reguleerimisviga. Lahutamisest tulenevalt nimetatakse antud süsteemi negatiivse tagasisidega süsteemiks. Leitud vea abil muudetakse juhttoime väärtust, millega protsessi edasi mõjutatakse [5, 4].

Käesolevas magistritöös kasutatakse negatiivse tagasisidega regulaatorit. Antud süsteemis on kontrollitavaks juhtimisobjektiks temperatuur reaktori sees, mida mõõdetakse ja võrreldakse sätteväärtusega. Kõrvalekalde esinemisel rakendatakse täiturile juhttoime.

1.3.2. Regulaatorid

Automaatjuhtimissüsteemis on regulaatori ülesandeks reguleerimisvea põhjal arvutada optimaalne juhttoime väärtus ning seejärel rakendada arvutatud juhttoime väärtus süsteemi täiturile. Juhttoime väärtuseks võib olla: pulsi laiuse väärtus, ajaline viivitus või positsioon [6].

Regulaatorid jagunevad diskreetseteks ehk katkelise toimelisteks ning pidevatoimelisteks. Diskreetsed omakorda jagunevad kahe- ja kolmeastmelisteks regulaatoriteks [4].

Kaheastmelisel regulaatoril on kaks olekut: sees või väljas. Kolmeastmelisel regulaatoril on lisafunktsioonina näiteks jahutamine. Võrreldes pideva regulaatoriga on diskreetne regulaator lihtsam, kuna sellel puuduvad muutujad, mida peab häälestama. Diskreetse regulaatoriga on võimalik seadeväärtust saavutada, kuid protsessi mõõteväärtus jääb alati seadeväärtuse läheduses ostsilleerima. Võnkumise vähendamiseks tuleb regulaatorisse integreerida hüstereesiparanduse või tundetusala algoritm. Hüstereesiveaga regulaatoril lülitatakse täitur välja enne seadeväärtuseni jõudmist ning sisse hilistumisega. Tüüpiliselt programmeeritakse mikrokontrollerisse funktsioon, mis arvestab hüstereesiviga ning seda on võimalik muuta. Hüstereesiväärtus valitakse empiiriliselt [5].

Katkelise toimega regulaatoritel tekib väikse hälbe korral kommuteerimine, mis tähendab, et täitur lülitatakse sisse maksimaalvõimsusega. Selle tõttu tekib ülereguleerimine ehk sätteväärtuse ületamine. Probleemi saab lahendada pidevatoimelise regulaatoriga ehk analoogregulaatoriga. Pidevatoimelised regulaatorid jagunevad üksikülidena kasutades proportsionaalseteks (P), integreerivateks (I), kombineeritult proportsionaalselt integreerivateks (PI) ja proportsionaalselt diferentseerivateks (PD) regulaatoriteks. Regulaator, mis võimaldab täielikku reguleerimist seadeväärtusel, nimetatakse proportsionaal-integraal- diferentsiaal (PID) regulaatoriks [5].

Regulaatori tüübi valimine oleneb süsteemi keerukusest ja reguleerimise olulisusest. Kas juhitav protsess on oma ehituselt keerukas või lihtne. Kuna antud süsteemis esineb reaktorisese materjali soojenemisel suur ajaline hilistumine, tuleb antud süsteemis kasutada mitme väljundiga pidevat regulaatorit.

1.3.3. Pidevatoimelised regulaatorid

P-tüüpi regulaatoril on reguleerimisvea suurus proportsionaalselt võrdeline regulaatori juhttoimega [5, 6]:

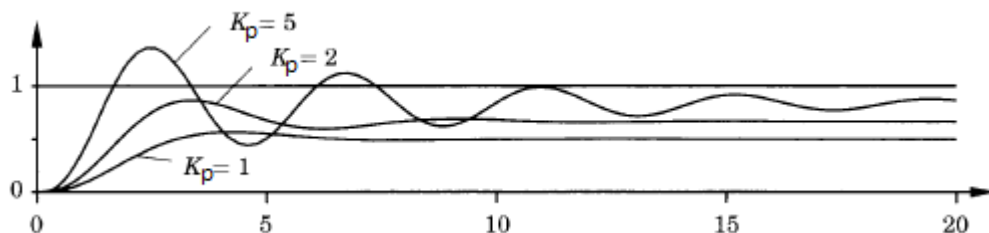
$$u(t) = K_p \cdot e(t), \quad (1.3.)$$

kus K_p on proportsionaalne võimendustegur;

$e(t)$ – reguleerimisviga, ajahetkel t ;

$u(t)$ – juhttoime.

Proportsionaalset võimendustegurit võib valemis vaadelda, kui seadekruvi, mille abil saab lisada või eemaldada proportsionaalse lüli juhttoimet. Häälestamisel valitakse võimendustegur vastavalt süsteemi reaktsioonile või hüppekajale juhttoimest sõltuvalt [6]. P-regulaatoritele on siirdeprotsessi lõpus omane staatiline viga, sest puudub inerts vea eemaldamiseks. Antud lüli nimetatakse ka inertsituks lüliks. Joonisel 1.4 on toodud näide proportsionaalsest regulaatorist kolme erineva võimendusteguri puhul.



Joonis 1.4. Proportsionaalse regulaatori siirdeprotsessigaafikud võimendusteguritega $K_p = 1$, $K_p = 2$, $K_p = 5$ [5].

Joonisel toodud siirete puhul süsteemi siirdeprotsessi juhttoime ja väljund sumbuvad teatud aja jooksul staatilise veaga seadeväärtusest. Staatiline viga küll väheneb proportsionaalse võimendusteguri tõstmisel, kuid see jääb esinema. Juhul, kui kasutada ülekaalustatud väärtusega K_p -d, siis tekib ülevõnge, kus seadeväärtus ületatakse. Pärast ülevõnget jääb süsteem pidevalt ostsilleerima seadeväärtusest siiski madalamal [6].

Selleks, et staatilist viga kaotada, kasutatakse integreerivat lüli, mille toimeks on reguleerimisvigade summeerimise teel staatilise vea kaotamine. *I*-regulaator summeerib eelnevalt esinenud vead, kuni staatiline viga elimineeritakse [6]:

$$I = K_I \cdot \int_{t_0}^t e(\tau) \cdot d\tau \quad (1.4.)$$

kus K_I on integreeriv võimendustegur;

τ – integreerimise aeg, s.

Proportsionaalse ja integreeriva lüli summeerimisel saadakse regulaatori väljundiks *PI*-regulaator, mille toimeks on kahe lüli koostoimel eemaldada staatiline viga. Eraldiseisvat integreerivat regulaatorit esineb praktikas vähe, sest selle toime on aeglane. Proportsionaalse lüli lisamisel integreerivale on tulemuseks kiirem reageerimine siirdeprotsessis [6]. Liiga

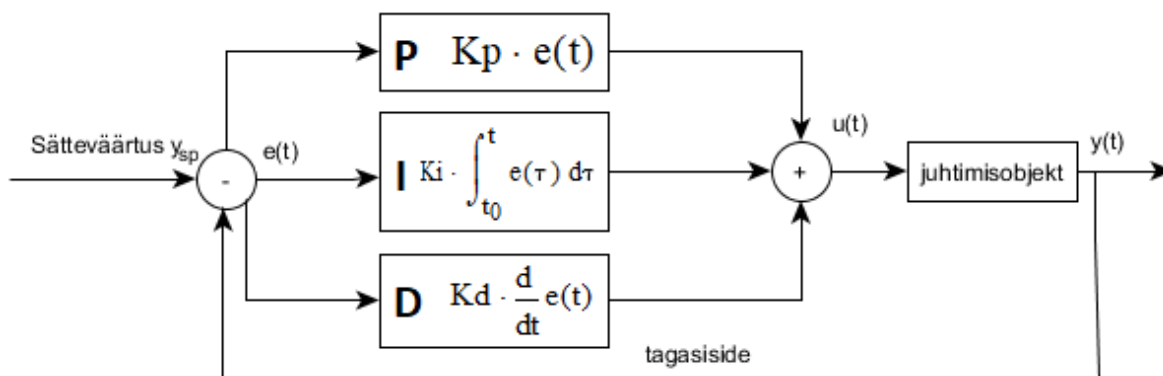
kõrge integreeriva lüli korral toimub ülereguleerimine. Madala integreeriva lüli korral kestab protsess kauem, kuid ülereguleerimine väheneb, sest protsessi hüppekaja on ettarvatavam [6].

Diferentseerivat eraldiseisvat regulaatorit praktikas ei esine, sest selle juhttoime pole seotud hetkevea väärtusega vaid hetkevea muutumise kaotamisega. Diferentseerivat lüli kasutatakse koos proportsionaalse lüluga ning selle eesmärgiks on süsteemi stabiliseerimine seadeväärtuse juures, ennustades ette vea muutumist, üritades muutumist elimineerida [6]. Täpsemalt on diferentseeriva lüli juhttoimeks impulsid, mis tekivad protsessiväärtuse muutumisel. Liiga kõrge K_D valimisel on impulsside arv tihedam ning regulaator on agressiivsem ja seetõttu ebastabiilsem. Kõrge K_D puhul stabiliseerub protsessiväärtus kõrgemal, kui on seadeväärtus. Väikse K_D puhul stabiliseeritakse protsessiväärtus madalamal säteteväärtusest. Diferentseeriva lüli õige väärtuse leidmine on kõige keerulisem, sest selle toime oleneb nii vea muutumisest, kui ka proportsionaalse lüli väärtusest. [6].

Kõigi kolme lüli summeerimisel on tulemuseks *PID* juhttoime väärtus, mille arvutusvalem on [6]:

$$u(t) = P + I + D = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int_{t_0}^t e(\tau) \cdot d\tau + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1.5.)$$

Kolme lüli summeerimine regulaatoris (joonis 1.5.) võimaldab õigesti valitud võimendustegurite väärtuste puhul väga täpset reguleerimist.



Joonis 1.5. PID regulaatori plokk skeem [5].

Iga lüli võimendiks on võimendustegur, mille väärtuse valimist mõjutab süsteemi reaktsioon juhttoimele. Võimendustegurite valimiseks on erinevaid meetodeid, näiteks saab teha

süsteemiseeritud *PID* häälestamist üldlevinud meetodil nagu Ziegler-Nicholsi meetodil. Teiseks võimaluseks on koostada täpne matemaatiline mudel. Matemaatiline mudel peab kirjeldama protsessi täpselt, vastasel juhul on võimendustegurite väärtused väärad ning neid tuleb korrigeerida. Lisaks on regulaatori häälestamiseks olemas tarkvarapakette, mille abil saab regulaatorit häälestada ning isoptimeerivaid süsteeme, mis vastavalt käimasoleva protsessi muutustele korrigeerivad võimendustegureid tarkvara funktsiooniplokkide abil. Neljandaks on manuaalhäälestus, kus igal katsel korrigeeritakse regulaatori võimendustegurite väärtuseid [5].

Võimendustegurite muutmisel vastavalt protsessigraafikule on aluseks kõikide lülide toimete tundmine ning oskus nende väärtuste muutmisel ennustada protsessigraafiku muutust. Samuti võib kasutada abivahendina tabelit, milles on toodud iga võimendusteguri toime.

Tabel 1.1. Võimendustegurite toimed siirdeprotsessile [7]

Võimendusteguri lisamine	Kasvu kiirus	Ülereguleerimine	Siirdeprotsessi kestus	Staatiline viga	Stabiilsus
$K_P +$	väheneb	suureneb	väike muutus	vähendab	halvendab
$K_I +$	väheneb	suureneb	suureneb	kaotab ära	halvendab
$K_D +$	ei mõjuta	väheneb	väheneb	ei mõjuta	parendab

Häälestamisel lähtutakse esmalt antud tabeli järgi ning hiljem juba heuristiliselt. Kokkuvõtvalt on tarvilik nimetada iga lüli otstarve *PID* regulaatoris. *P*-lüli sulgeb tagasiside ahela, ehk seadeväärtuse erinevus väljundväärtusest genereerib proportsionaalselt võrdelise juhttoime. *I*-lüli tagab seadeväärtuse saavutamise integreerides vea väärtust igal ajaintervallil, kuni viga elimineeritakse. *D*-lüli parendab süsteemi stabiilsust ja tekitab seadeväärtuse lähedal dünaamilise juhttoime.

1.3.4. Alluvkontuuriga juhtimine

Automaatjuhtimises esineb aeglase dünaamikaga protsesse, kus tulenevalt mõõdetava protsessiväärtuse hilistumisest peab juhtimiseks kasutama mitut protsessiväärtust ehk rakendada alluvkontuuriga juhtimist. Alluvkontuuriga arhitektuuri saab kasutada, kui

süsteemis on vähemalt kaks juhitavat muutujat. Kaskaadjuhtimise kasutamiseks on eelduseks: põhikontuuril ei tohi olla hilistumist ning see peab avaldama mõju alluvale kontuurile. Protsessi juhitakse ilma hilistumiseta põhikontuuri abil, kuni hilistumisega protsessiväärtustus muutub juhitavaks [8].

Vee soojendamiseks kulub aega, sest see on madala soojusjuhtivusega. Käesolevas magistritöös käsitletakse vee ja biomassi segu, mille maht on reaktoris $\sim 0,8$ L. Sellest tulenevalt, et segu peab reaktoris kuumutama, tekib süsteemis paratamatu hilistumine, mille tõttu ei saa temperatuuri juhtida ainult reaktorisese temperatuuri alusel. Antud juhul on teiseks protsessiväärtuseks küttekeha temperatuur, mille abil kuumutatakse reaktor konstantsele kõrgendatud välistemperatuurile. Kui temperatuur jõuab reaktori sees seadeväärtuseni saab hakata küttekeha juhtima reaktorisese temperatuuri järgi.

1.4. Termo-elektrilised temperatuuriandurid

Elektrilised temperatuuriandurid muundavad tajutava temperatuuri elektriliseks signaaliks. Elektrilisteks temperatuurianduriteks on takistuslikud, termo-elektrilised ja pooljuht-temperatuuriandurid. Takistuslikel temperatuurianduritel sõltub temperatuur mõõdetavast takistusest. Olenevalt tüübist toimub takistuse tõusmine või langemine vastavalt temperatuurile. Takistuslikud temperatuuriandurid jagunevad: Metall- termotakisti (*RTD*: Pt- $-200...650$ °C), negatiivse tunnusjoonega termistor (*NTC*, $-80...250$ °C) ja positiivse tunnusjoonega termistor (*PTC*, $0...130$ °C). Pooljuht-temperatuuriandurid töötavad *pn*-siirde alusel ning neid kasutatakse integraallülitustel põhinevates mikroskeemides. Pooljuht-temperatuuriandurite mõõtevahemik on $-55...150$ °C. [9].

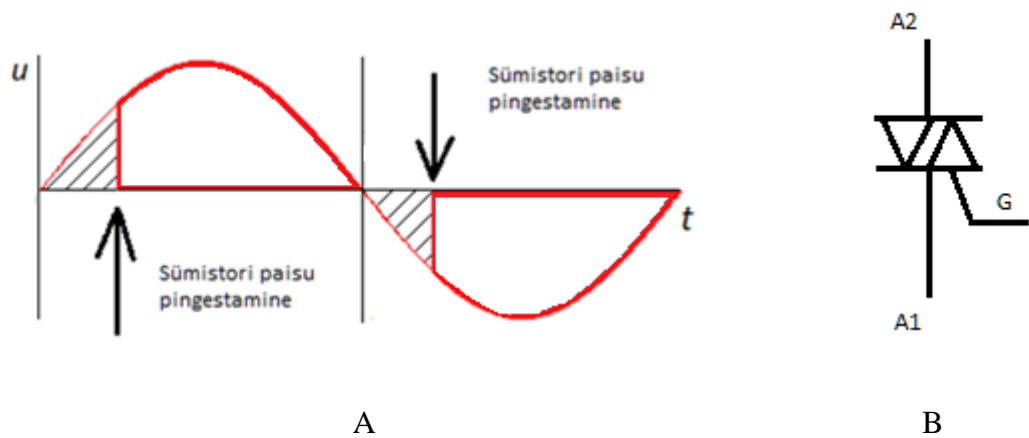
Tööstuses kõige levinum kasutatav temperatuuriandur on termopaar. Termopaarid on termo-elektrilisel efektil töötavad temperatuuriandurid, millega mõõdetakse temperatuure $-200...1800$ °C. Termopaarid töötavad tänu kasutatavate materjalide termo-elektrilisele omadusele. Kaks erineva elektrijuhtivusega ja termo-elektriliselt erinevat metalli on galvaaniliselt ühendatud mõõtekohas ning vastavalt temperatuurile tekib ühenduskohas termo-elektrilisest omapärast elektromotoorjõud. Termo-elektrilise nähtuse põhimõtteks on temperatuurimõõtmisel kasutatavate materjalide elektronpotentsiaalide erinevus. Tüüpilisel termopaariahelas on kasutusel kaks erinevat termo-elektrilist juhti, mis ühendatakse kahes

mõõtepunktis. Esimene mõõtepunkt, mille temperatuuri soovitakse mõõta on kuum mõõtelitnik, teine, mille väärtus on võrdne keskkonna temperatuuriga on referentspunktiks. Temperatuuri muutudes koguneb ühele juhile rohkem elektrone, kui teisele. Tekkiv elektromotoorjõud on proportsionaalne kahe liitmiku temperatuurierinevusega ja juhtmete materjalidega ning seda mõõdetakse millivoltides. Olenevalt termopaari tüübist (B, E, J, K, N, R, S, T), erinevad juhtidena kasutatavad materjalid ja standardiseeritud isolatsiooni kaablite värvused. Iga termopaari tüüpi iseloomustab lineaarne tunnusjoon, millelt saab lugeda temperatuuri sõltuvuse signaali väärtusest. [9].

Termopaarid jaotatakse kasutatavate metallisulamite järgi gruppidesse. Gruppe iseloomustavad metallidena kasutatavad termopaaride materjalid, temperatuurist sõltuv elektromotoorjõud ja mõõdetav temperatuurivahemik. Vastavalt kättesaadavusele ja mõõdetavatele temperatuuridele valitakse süsteemi sobivad termopaarid.

1.5. Vahelduvpinge reguleerimine sümistoriga

Türistor kasutatakse elektriabelates pooljuhtlülititena. Pn - siirde alusel töötav türistor koosneb $p-n-p-n$ pooljuhtkihtidest. Türistoride perekonda kuuluvad antud töös nimetatud diodtüristor ning kasutatav sümistor. Sümistor on kõige keerulisema ehitusega türistor, sest selle abil on võimalik voolu juhtida mõlemas suunas, mis teeb ta kasutatavaks vahelduvvooluahelates, nt sujuvkäivitina. Oma olemuselt koosneb sümistor kahest vastuparalleelselt ühendatud türistorist, omades ühte, ühist paisu, millele voolu lisamisel avatakse tee anoodilt katoodile ning vastupidi (joonis 1.6. - B). Sümistori anoodi ja katoodiga ühendatakse reguleeritav seade jadamisi. Paisule tühjuse voolu lülitamisel hakatakse voolu juhtima anoodilt katoodile ning vastupidiselt, olenevalt millisel sinusoidi poolperioodil lülitushetkel asutakse (joonis 1.6. - A). Voolu juhtimine toimub sümistori anoodil ja katoodil kuni pinge suuna muutumiseni, st kuni pinge läbib nulliristumise vahelduvvoolus. Sama protsessi korratakse järgneval poolperioodil pinge vastandväärtusel. Selle tulemusena toimub elektriseadmele lubatava pinge äralõikamine ehk aktiivvõimsuse reguleerimine. [10].



Joonis 1.6. A – Faasinurga reguleerimine vahelduvpinge sinusoidi lõikamisel; B – sümistori elektriskeemi tingmärk.

Vastavalt sümistori töötamisele peab seadmes olema kaks komponenti. Üks fikseerib vahelduvpinge suunamuutuse ning teine reguleerib vastavalt sätestatud ajale sümistori paasu avamist. Sümistore eristatakse võimsuse järgi ja neid liigitatakse väikse, keskmise ja jõusümistorideks. Jõusümistoridel kasutatakse jahutusradiaatorit, sest kahe-suunalise voolu juhtimisel eraldub siirdes suur soojushulk.

2. LÄHTEÜLESANDE PÜSTITAMINE

2.1. Nõuded seadmele

Selleks, et seadet projekteerida tuleb seadmele esitada toimivus- ja ohutusnõuded. Projekteeritavale seadmele on esitatud järgnevad nõuded:

1. Seadme abil peab olema võimalik biomassi reaktori sees kütta sätetemperatuurini 100 °C...200 °C.
2. Seade ei tohi biomassi ja vee segu üle kütta rohkem, kui 5 °C ning kindlasti ei tohi toimuda alareguleerimist, kus sätetemperatuuri ei saavutatagi. Sellest tulenevalt peab läbi viima regulaatori häälestamise nii, et antud tingimused oleksid täidetud.
3. Süsteemi tuleb integreerida kaks temperatuuriandurit, millest üks paigutatakse reaktori pealt sisenevasse pesasse ning teine kütkehale.
4. Temperatuuriandurid peavad töötama täpselt, st need tuleb isoleerida keskkonnast ja roostevabaterasest, et vältida vigaseid andurite näitusid.
5. Temperatuuri reguleerimiseks kasutatakse kahe kanaliga kaskaadjuhtimist vastavalt temperatuuriandurite näitudele.
6. Enne kütmist peab olema võimalik muuta võimendustegurite väärtuseid ja kütmise parameetreid.
7. Eelmisena kasutatud kütmise parameetrid salvestatakse mikrokontrolleri püsimälusse.
8. Projekteeritav seade peab olema ohutu nii elektrilistest ühendustest kui ka programmisiseselt rakendama ohutuslauseid.
9. Koostada seadmele kasutusjuhend, mis kirjeldab erinevate komponentide ühendamist seadmega ning seadme töötamist.

Esitatud nõuete täitmisel on tulemuseks ohutu temperatuuriregulaator, mida kasutatakse temperatuuri reguleerimiseks biomassi eeltötlussüsteemis.

2.2. Turu-uuring

Erinevad pidevatoimelised ja diskreetsed regulaatorid, millega reguleeritakse temperatuuri on laialt levinud ning esinevad tarbekaubana. Antud kuumutussüsteemis eelnevalt kasutatud regulaator oligi integreeritud süsteemi vastavalt soovile reguleerida temperatuuri, kuid ühe sisendiga regulaatorist selle probleemi lahendamiseks ei piisa. Sellest tulenevalt, et süsteemis on suure hilistumisajaga mõõteväärtus tuleb kasutada vähemalt kahe protsessiväärtusega kaskaadjuhtimist. Ülevaade erinevatest mitme-kanaliga kontrollieritest on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Erinevad kaskaadjuhtimisega kontrollierid [11, 12, 13]

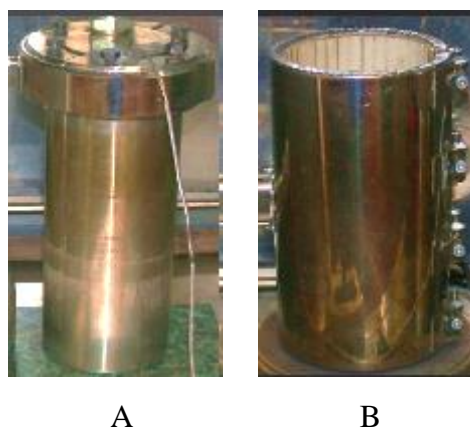
Regulaatorite võrdlustabel	KS 94	MA900	EZ Zone-PM, 1/8DIN
Tootja	West-cs	rKc INSTRUMENT	Watlow
Maksimaalne vool	2 A	3 A	15 A
Kanalite arv	12	4	8
Hind	620 €	570 €	160...900 €

Kõikidel tabelis toodud seadmetel on võimalik seadistada regulaatorit manuaalselt või kasutada iseoptimeerimist. Regulaatorid võimaldavad kasutada *ON/OFF*, *P*-, *PI*-, *PD*- ja *PID* töörežiime. Controlleritele on võimalik ühendada kõiki tüüpe termopaare ning takistusliku temperatuuriandurit Pt100. Kaskaadjuhtimisega tööstuskontrollerid on kvaliteedilt väga kõrgelt hinnatud ning sellest tulenevalt ka kallid. Üks põhjuseid antud magistritöö koostamiseks oligi luua kättesaadavate vahenditega konkreetne seade, mis võimaldaks lahendada keerulisemat reguleerimisprobleemi.

2.3. Küttesüsteemi ülesehitus

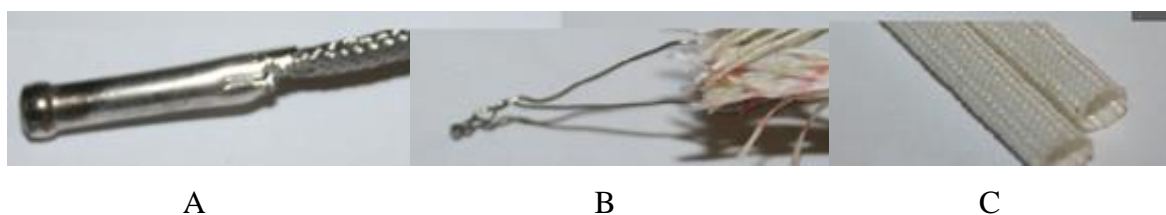
Roostevaba terasest valmistatud reaktor A (joonis 2.1.) kaetakse keraamilise küttelemendiga B. Küttelemeni moodustavad 8mm paksune klaaskiudisolatsioon, selle sisse paigutatud takistustraata, mineraalvillast isolatsioon ning roostevaba lehtterasest valmistatud korpus. Vaadeldav kütteelement on madala soojusliku efektiivsusega, st palju

soojust antakse ära väliskeskkonda. Konstruktsiooni tõttu kulutab küttekeha konstantsel temperatuuril hoidmine palju energiat.



Joonis 2.1. Biomassi eeltötlusreaktor (A) ja keraamiline kütteelement (B).

Seadmele valiti temperatuuri mõõtmiseks süsteemis K-tüüpi termopaarid. Küttekeha termopaar paigutati küttekeha ja reaktori seinte vahele (joonis 1.1.). Küttekeha termopaari isoleerimine teostati kasutades klaaskiud-materjalist kuumakindlat isolatsiooni (joonis 2.2. C), mille abil isoleeriti termopaar roostevaba terasest. Vastasel juhul tekib andurile elektriline mõõtehäiring. Teine termopaar, mis mõõdab temperatuuri reaktori sees on paigutatud reaktori päises asuvasse pesasse. Stabiilseima tulemuse leidmiseks katsetati antud termopaariga mõõtmisel erinevaid isolatsioonilahendusi: klaaskiud-isolatsioon C ning roostevaba terasest hülsiga A lahendust. Parimaks lahenduseks osutus kombinatsioon mõlemast, kus klaaskiuga isoleeritud termopaar sisestati hülsi sisse.



Joonis 2.2. Termopaari isoleerimine. A – Metallhülsiga ja selle seest klaaskiuga isoleeritud termopaar; B – isoleerimata termopaar; C – klaaskiud isolatsioon.

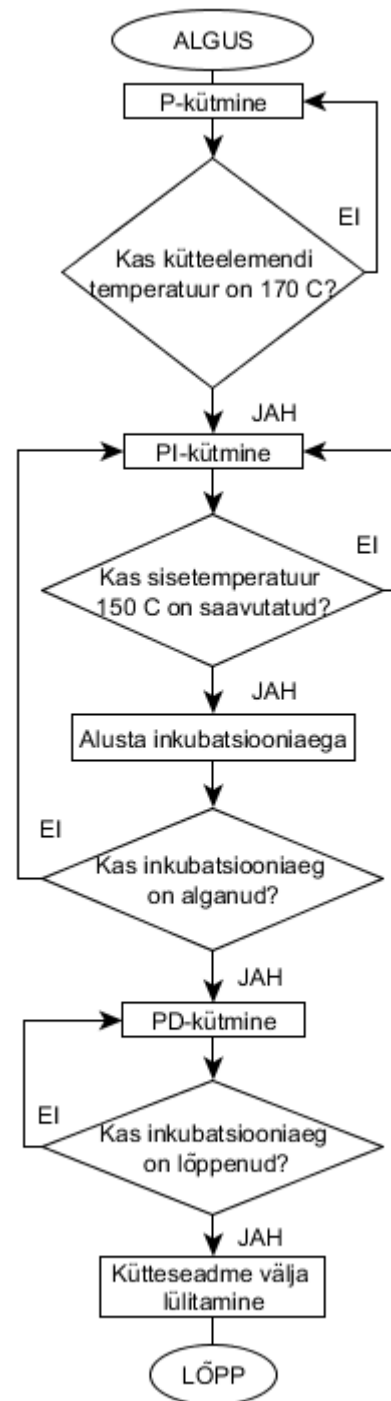
Projekteeritav regulaator koosneb alalis- ja vahelduvvooluahelast. Vahelduvvooluahelas on küttekeha juhtivaks põhielemendiks sümistor, mis on ühendatud küttekehaga jadamisi. Vahelduvvooluahelas on küttekehaga jadamisi ühendatud ka kaitserellee, mis kommuteeritakse ainult kütmise ajaks. Alalisvooluahela põhielemendiks on

mikrokontroller, mille programmeerimiseks kasutatakse Arduino *IDE* tarkvara. Mikrokontrolleri viikudega on ühendatud erinevad seadmed nagu lülid, valgusdiodid, optoisolaator, sumisti jne. Koostatud trükkplaat paigutatakse korpuse sisse, mille valmistamiseks kasutatakse CNC freesimise või 3D printimise töötlemistehnoloogiat. Seadmele on lisatud kasutaja jaoks vedelkristallekraan, millele kuvatakse informatsioon. Korpusel on vedelkristallekraani vahetusse lähedusse kasutajale lülid, mille abil saab kütteparameetreid muuta. Regulaatorina kasutatakse alluvkontuuriga *PID* juhtimist, mis vastavalt mõõdetavatele temperatuuridele arvutab programmisel juhitoime väärtuse, mis rakendatakse täiturile ehk pooljuhtreleele.

2.4. Juhtimisalgoritmi kirjeldus

Projekteeritaval seadmel on mikrokontrolleri põhiprogrammi koostatud kütmise algoritm. Kasutatavaks vahendiks on kirjanduse analüüsis uuritud *PID* regulaator või kombineeritult üksik või paarisregulaator, näiteks *PI*- või *PD*- regulaator. Antud süsteemis tekib reaktorisel temperatuurikasvu hilistumine, mis on tingitud reaktori seina soojusjuhtivusest ning madalast biomassi ja vee segu soojusjuhtivustegurist. Roostevaba terasel on kõrge soojusjuhtivustegur ning selle kuumutamine toimub kiiresti. Eelnevalt kirjeldatud probleemi lahendamiseks tuleb luua kaskaadjuhtimisega regulaatori juhtimisalgoritm. Protsessis antakse regulaatorile temperatuuride väärtuseid ette mõlemate süsteemi temperatuuriandurite poolt. Loodud kuumutamise algoritm on toodud joonisel 2.3.

Vahetult enne kütmist määratakse regulaatorile konstantne seadetemperatuur, mida tahetakse reaktori sees saavutada ning inkubatsiooniaeg, kui kaua valitud temperatuuri hoitakse. Esmalt alustatakse kütmist reaktorivälise temperatuurianduri alusel kasutades vaid proportsionaalset lüli. Reaktoriväliselt köetakse küttekeha temperatuur 10...40 °C kõrgemaks kui on sätetemperatuur reaktori sees, et süsteemis oleks kõrgem soojusvoog ning protsess kulgeks kiiremini. Kümme kraadi enne küttekeha temperatuuri saavutamist toimub integraatori sisselülitamine, et küttekeha sätetemperatuuri saavutamine kindlustada. Integraatori hilisem sisselülitamine on põhjustatud integraatori kuhjumise vältimiseks, mis põhjustab ülereguleerimist. Nüüd toimub reaktori kuumutamine konstantsel küttekeha temperatuuril, kuni sätetemperatuur saavutatakse reaktori sees. Seadetemperatuuri saavutamisel toimub regulaatori ümberseadistamine ja inkubatsiooniaja loenduse alustamine. Nüüd hakatakse temperatuure regulaatorile ette andma reaktorisese anduri abil ning ühtlasi muudetakse *PI*-regulaator *PD*-regulaatoriks. Integreerivat lüli pole enam tarvis kasutada, sest staatilist viga ei ole. Proportsionaalsele lülile lisatav diferentseeriv lüli stabiliseerib temperatuuri sätteväärtuse juures. Pärast inkubatsiooniaja lõppu lülitatakse kütmine välja, et süsteem saaks jahtuda plahvatusliku rõhulangetuse teostuseks.



Joonis 2.3. Kütmise algoritm

3. SEADME PROJEKTEERIMINE

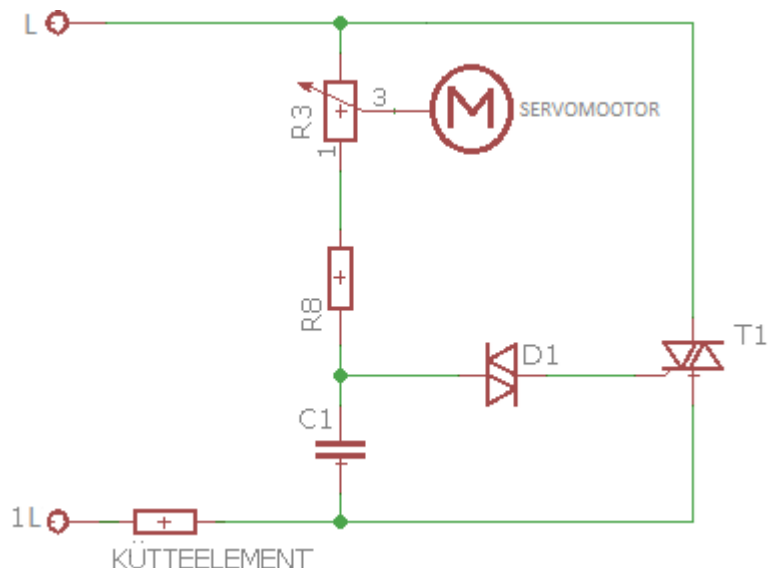
3.1. Regulaatori täituri juhtimine

Projekteerimise esimese ülesandena oli luua süsteemile sobiv elektriline või elektermehaaniline täituri juhtimise meetod, mis vastavalt juhttoime väärtusele muudab sümistori abil vahelduvpinge faasinurka. Loodi kolm erinevat lahendust, mis on toodud morfoloogilises tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Regulaatori väljundina muudetava parameetrite genereeritud ideede morfoloogiline tabel

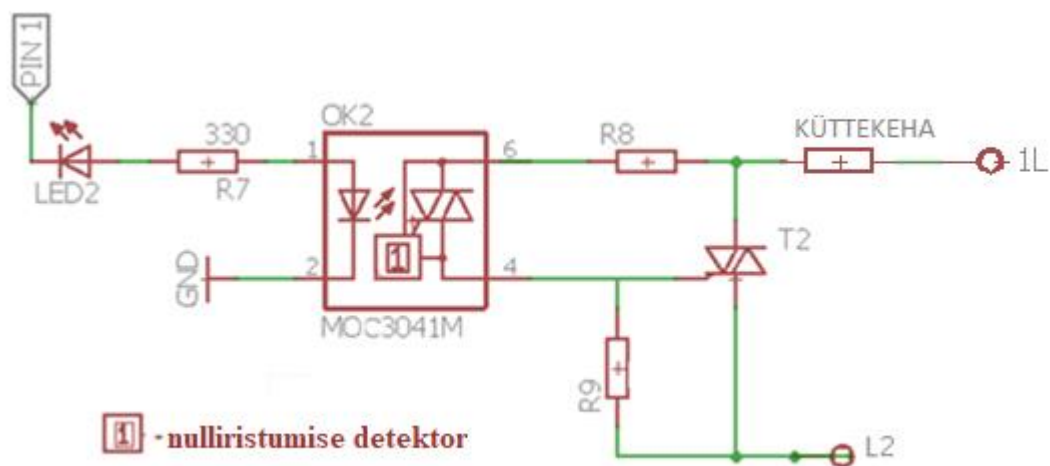
Lahenduse nimetus	täitur	regulaatori väljund	sobivus	märkused
Potentsiomeetri ja servomootori lahendus	sümistor	servomootori pöördenurk $0 \dots 180^\circ$	halb	mehaaniline komponent
4N25 ja MOC3021 Optoisolaatorite lahendus		ajaline viivitus nulliristumisest faasipinge poolperioodis: $0 \dots 10 \text{ ms}$	hea	ajalise vea tekkimine
MOC3041 Optoisolaatori lahendus		pulsilaius: $0 \dots 255$	väga hea	

Esimeseks lahenduseks disainiti servomootoriga ühendatud potentsiomeetri lahendus (joonis 3.1.), kus servomootori pöördenurga reguleerimisega muudetakse potentsiomeetri $R3$ abil kondensaatori $C1$ täislaadimise intervalli ja sellest tulenevalt reguleeritakse diodtühistori $D1$ avamishetke. Diodtühistori avamisel tüüritakse vahelduvpinge sümistori $T1$ paisule ning see avatakse, kuni faasipinge poolperioodi nulli ristumiseni. Selle lahenduse puhul oleks regulaatori juhttoime väärtuseks servomootori pöördenurk [14].



Joonis 3.1. Servomootoriga ja potentsiomeetriga kütteelementi reguleeriv elektrialhel [14].

Potentsiomeetri ja servomootori lahendus ei sobi antud töös rakendamiseks liikuvate osade tõttu. Teine lahendus on arendus esimesest, kaotades seadmest liikuvad komponendid: servomootor ja potentsiomeeter. Faasinurga reguleerimist on võimalik teostada ka elektriliselt, mikrokontrolleri katkestusviigu abil. Potentsiomeetri, kondensaatori ja diodtühistori asendatavaks seadmeks on optoisolaator MOC302x, mis infrapuna valgusdiodi ja fototransistori abil juhivad vahelduvvooluahelas olevat sümistori (joonis 3.2.). Kuna vahelduvpinge hetkväärtus muutub sinusoidselt, siis on tarvis teada, millal pinge polaarsus vahetub. Selleks kasutatakse optoisolaatorit 4N25, mis edastab signaali mikrokontrolleri katkestusviigule, millal pinge võrdub nulliga. Pärast ajalast viivitust avatakse MOC302x abil sümistori paisu abil voolu juhtimine anoodi ja katoodi vahel ning voolu juhitakse kuni järgmise nulliristumise hetkeni. MOC302x kasutatakse madala võimsustega elektrialhelates, mis tähendab, et antud element pole kütteelemendiga jadamisi ühendatud vaid juhivad eraldiseisvat jõusümistori. Kondensaatori asemel määrab lülitusaega mikrokontroller, arvutades vastavalt pidevatoimelise regulaatori juhttoime valemitele viivituse kestuse, millal sümistor avatakse [15, 16].



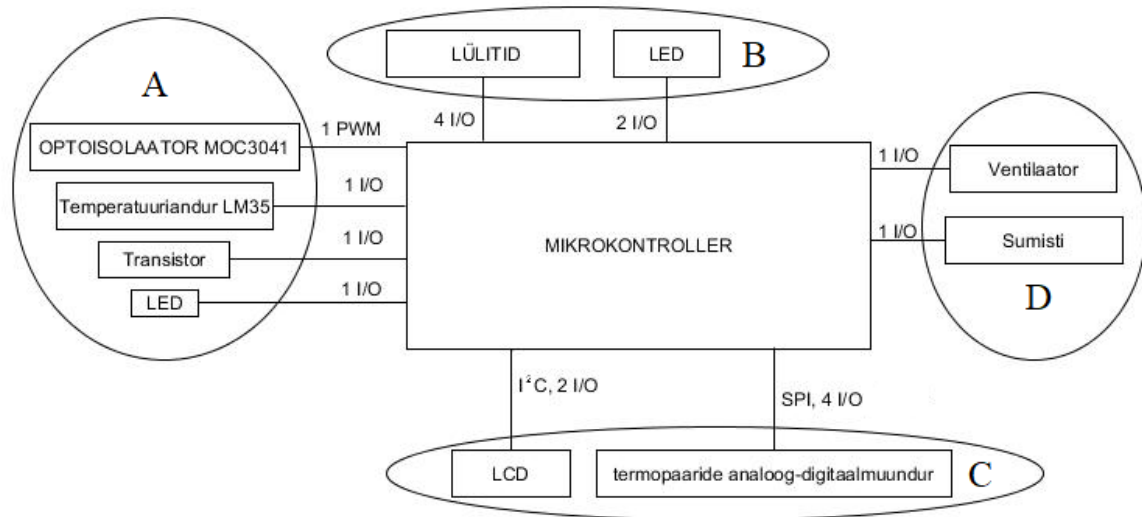
Joonis 3.3. Optosümistoriga reguleeritava küttelemendi elektriabel [17].

Probleemi lahendamiseks valitakse MOC3041 optosümistor, mis vastavalt pulsi laiuse väärtusele muudab jõusümistori avamishetke vahelduvpinge poolperioodis.

3.2. Elektroonika osa projekteerimine

3.2.1. Mikrokontrolleri valik

Enne mikrokontrolleri valikut tuleb koostada skeem (joonis 3.4.), mis näitab, milliseid seadmeid on tarvis regulaatorisse integreerida. Seadmete arv määrab viikude arvu mikrokontrolleril. Teiseks oluliseks kriteeriumiks on mikrokontrolleri valikul sidestamisvõimalus *SPI* ja *I²C* kasutajaliidestega, mis soodustavad erinevate komponentide nagu *LCD* ja termopaaride analog-digitaalmuunduri kasutamist.



Joonis 3.4. Mikrokontrolleriga ühendatavate seadmete skeem. A – Regulaatori trükkplaadile paigutatavad komponendid; B – lülitimoodulile paigutatavad seadmed; C – valmistootena seadmesse integreeritavad komponendid; D – valikuliselt lisatavad seadmed; *I/O* – sisend, väljund; I^2C – jadasiin; *PWM* – pulsilaiusmodullatsioon; *SPI* – neljajuhtmeline järjestiksiin.

Valitavaks mikrokontrolleriks on Atmeli poolt loodud AVR perekonda kuuluv Atmega328p, mis on 8-bitine mikrokontroller. Valiku põhjuseks on sobivus viikude arvult, püsimälu olemasolu ning ühilduvus Arduino programmeerimiskeskkonnaga. Mikrokontrolleril on 32 KB programmeeritavat mälu ja 1 KB elektriliselt kustutatavat kirjutuskaitstud püsimälu. *EEPROM*-i abil saab protsessi parameetreid salvestada mikrokontrolleri püsimälusse. Andmelehe põhjal võimaldab antud mikrokontroller püsimälusse ülekirjutusi kokku 100 000 korda. Kokku on 23 digitaal-analoogviike, mille abil saab seadme funktsioone täitvaid komponente juhtida. Seadmel on pulsilaiusemodulatsiooniga viike, mis tähendab, et saab rakendada pulsi laiuse abil reguleerimist. *PWM* viike kasutatakse optiliste ning elektromehaaniliste seadmete juhtimiseks. Kasutades 16 MHz kvartsotsillaatorit on Atmega328-l ajaline resolutsioon 4 mikrosekundit [18, 19].

3.2.2. Vahelduvvooluahel

Vahelduvvooluahel on toodud joonisel 3.5. Ahelasse kuulub kahekontaktiline kruviklemm L , IL , millega ühendatakse toite ja kütteelemendi faasijuhe. Kütteelement ühendatakse sümistoriga jadamisi, mis tähendab, et suur vool liigub joonisel paksu, roheline joonega

sisseehitatud nulliristumise detektor, mille abil fikseeritakse vahelduvpinge nullväärtuse ületamise hetk. Selle järgi leitakse ajaline hilistus, millal avada sümistor vastavalt pulsi laiuse väärtusele seadmes [17]. Pulsi laiuse väärtuseks on *PID* kontrolleri poolt teostatav juhttoime arvutus, mille tulemusel toimub kütteelemendile lubatava voolu ja pinge väärtuse reguleerimine ning sellest tulenevalt ka küttekeha temperatuuri reguleerimine.

3.2.3. Alalisvooluahel

Seadmes kasutatavad regulaatori elektriskeemid ja trükkplaadi skeem on välja toodud lisas 1. Mikrokontrolleri viigud on ühendatud erinevate seadme funktsioone täitvate elektroonika komponentidega: lülitid, valgusdiodid, optoisolaator jne. Analoooviigud on ühendatud temperatuurianduri LM35 ja I^2C jadasiini mooduli kaudu *LCD*-ga.

Lisaks regulaatori trükkplaadile on valmistatud ka lülitimooduli trükkplaat – lisas 2 koos elektriskeemiga. Seadme kasutajale on esipaneelile toodud neli lülitit, mille abil saab muuta kütmise parameetreid ning kuvada ekraanil erinevaid väärtuseid. Seadmest on välja toodud kaks valgusdiodi, millest üks annab märku kütmise töötamisest ning teine inkubatsiooniajast.

LED valgustiga ühendatakse jadamisi voolutugevuse piiramiseks takisti, mis valiti vastavalt optimaalse töötamise voolutugevusele. Selleks, et valgusdiodide eluiga pikendada valiti minimaalne töötamise voolutugevus $I_{LED} = 10$ mA ja valgusdiodidega kasutatav takisti leiti Ohmi seaduse abil [18]:

$$R = \frac{U_R}{I_{LED}} = \frac{U_{IN} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5 - 1,8}{0,01} = 320\Omega, \quad (3.1.)$$

kus R on takistus Ω ;

U_R – pingelang takistil V;

I_{LED} – valgusdiodi töövool A;

U_{IN} – sisendpinge V;

U_{LED} – pingelang valgusdiodil V.

Valgusdiodidega kasutatakse jadamisi voolutugevust piiravate takistitega $\sim 320 \Omega$.

Toitepinget varustava seadmena on otstarbekas kasutada korpusevälist valmistoode, mis muundaks sisseehitatud trafo abil vahelduvpinge alalispingeks ning langetaks pinge 9...12 V väärtusele. Antud toitesead peab olema suuteline varustama alalisvooluahelat vähemalt 0,4 A voolutugevusega. Trükkplaadile on integreeritud pingeregulaator LM7805, mis muundab sisendpinge 9...12 V väljundpingeks 5 V ja on vastuvõetav kõikidel alalisvooluseadmetel trükkplaadil ja elektromagnetreleel. Pinge reguleerimise tulemusena väheneb väljund 7 V võrra, mistõttu eraldub seadmelt rohkesti soojust. Vahelduvvooluahela kaitseks kasutatav elektro-magnetreleel kommuteerimis-kontaktidega on paralleelselt ühendatud diod, mis tühistab vastulülitamise nähtuse tulenevalt rele ümberlülitamisest.

Termopaaridest on otstarbekaim valida K-tüüpi või E-tüüpi termopaar. Valiku põhjuseks on andmete stabiilsus, temperatuurivahemik, hind ja kättesaadavus. Nimetatud termopaaridest tuleks eelistada E-tüüpi termopaari, mis on pisut kallim, kuid kõrgema stabiilsuse ja pingesignaali väärtustega. Termopaaridena leiavad seadmes rakendust siiski K-tüüpi termopaarid, mis on kõige levinumalt kasutatavad termopaarid. Termopaaride poolt mõõdetavate temperatuuride lugemiseks ja edastamiseks kasutatakse mikroskeemil põhinevat analoog-digitaalmuundurit MAX6675. Komponent edastab termopaari võimendatud signaali 12-bitise väärtusena, mis võimaldab lugeda temperatuuri vahemikus 0...1023,75 °C. MAX6675 sidestatakse mikrokontrolleriga *SPI* andmesiini kaudu. Lisas 3 on toodud komponendi ja termopaaride ühendusskeem [21].

Seadme korpuse sees temperatuuri monitoorimiseks on lisatud trükkplaadile pooljuht-temperatuuriandur LM35, mis annab informatsiooni korpusesisese temperatuuri kohta. Regulaatori katsetamisel mõõdeti korpuses olevat temperatuuri ja kaaluti jahutusventilaatori kasutamist.

Kuvarina on parim valik I^2C adaptermooduliga lahendus, sest selle töötamiseks kasutatakse vaid kahte mikrokontrolleri viiku: andmesiini (*SDA*) ja kellatakti (*SCL*). Ilma I^2C moodulita on mikrokontrolleri viikused tarvis kasutada koguni kuus ning sellega oleks pidanud kasutama suurema viikude arvuga mikrokontrollerit. Kuvariks valiti 4x20 *LCD*. Lisas 4 on toodud kõikide ühendatavate komponentide: *LCD*, lülitimooduli, termopaaride ja kütteelemendi ühendamise juhend.

3.3. Jahutusradiaatorite soojustakistuse arvutus

Käesolevas alajaotises leitakse seadmes kasutatavate soojusteraldavate elektroonikakomponentidele jahutusradiaatorite nõutavad minimaalsed soojustakistused, mille alusel jahutusradiaatoreid valitakse. Jahutusradiaatorite ja elektroonika komponentide iseloomustavaks parameetriks on nende soojustakistus θ , mis näitab mitu kraadi hajutatakse elektroonika komponendis soojuseks. Suurim soojuse eraldumine toimub vahelduvvooluahelas sümistoril, kuna selles toimub suure, kahesuunalise voolu juhtimine. Teine element, mis süsteemis soojust eraldab on pingeregulaator LM7805. Soojuse eraldumine tekib sisendpinge 12 V väljundpingeks 5 V reguleerimisest, millest tulenevalt eraldub suurem osa soojuseks [22].

Esmalt arvutatakse, kas pingeregulaatoril on eralduva võimsusega tarvis kasutada jahutusradiaatorit. Sümistori arvutusel vastavalt valemitele (3.5, 3.6) arvutatakse soojustakistused, mille alusel hinnatakse komponendile valitava jahutusradiaatori sobiv suurus.

Regulaatori LM7805 maksimaalne lubatav soojuseraldus ilma jahutusradiaatorita ning mitte maksimaalset siirde töötemperatuuri ületades [22]:

$$P_{LM7805} = \frac{T_J - T_A}{\theta_{JA}} = \frac{125 - 25}{19} = 5,26 \text{ W}, \quad (3.2.)$$

kus T_J on sümistori siirde maksimaalne töötemperatuur °C;

T_A – normaaltemperatuur °C;

θ_{JA} – soojustakistus siirdelt väliskeskkonda $\frac{\text{K}}{\text{W}}$.

Maksimaalseks lubatavaks võimsuseks ilma jahutusradiaatorit kasutamata on 5,26 W. Teades teoreetilist lubatud soojuse eraldumist tuleb leida tarbitava voolu ja pingega tekkiv soojuseeraldumine vattides:

$$P_{arvutuslik} = (U_I - U_O) \cdot I_{\max} = (12 - 5) \cdot 0,4 = 2,8 \text{ W}, \quad (3.3.)$$

kus U_I on sisendpinge V;

U_O – väljundpinge V;

I_{\max} – ligikaudselt määratud maksimaalne vool seadmes A.

Tegelik eralduv võimsus on seadmes 2,8 W. Võrreldes tegelikku soojuste eraldumist teoreetilise saad koostada seose. Seose alusel võib järeldada, et pingeregulaator suudab ilma jahutusradiaatorita antud süsteemile pinget langetada, ilma siirde ülekuumenemiseta 125 °C:

$$P_{tegelik} \leq P_{LM7805} . \quad (3.4.)$$

Tulenevalt trükkplaadi mõõtmete piirangust projekteeriti elektroonika seadmed trükkplaadile suure tihedusega ning pingeregulaator asub lähedal analoog-digitaalmuundurile. Et vältida referentstemperatuuri kasvu, peab soojenemist ikkagi piirama, sest vastavalt MAX6675 andmelehele tuleb seadme sujuva töö tagamiseks eraldada soojuslikud allikad [21].

Sümistori arvutusel valitakse soojuste eralduv võimsus komponendi andmelehe graafikult, millel on võimsus ja vastav voolutugevus. Graafikult saab lugeda, et maksimaalse kütteelemendi $I_T = 12 \text{ A}$ voolutugevuse juures on eralduvaks võimsuseks $P_D = 10,5 \text{ W}$ [20].

Valemiga (3.5) arvutatakse vajalik soojuste hajutatavus siirdelt keskkonda [22]:

$$\theta_{JA} = \frac{T_J - T_A}{P_D} = \frac{125 - 25}{10,5} = 9,5 \frac{\text{K}}{\text{W}} . \quad (3.5.)$$

Selleks, et leida radiaatori vajalik maksimaalse väärtusega soojushajutatavus, tuleb leitud väärtusest lahutada seadme enda korpuse soojustakistus [22]:

$$\theta_{SA} = \theta_{JA} - \theta_{JC} = 9,5 - 0,6 = 8,9 \frac{\text{K}}{\text{W}} , \quad (3.6.)$$

kus θ_{JC} on soojustakistus siirdelt seadme korpusesse $\frac{\text{K}}{\text{W}}$.

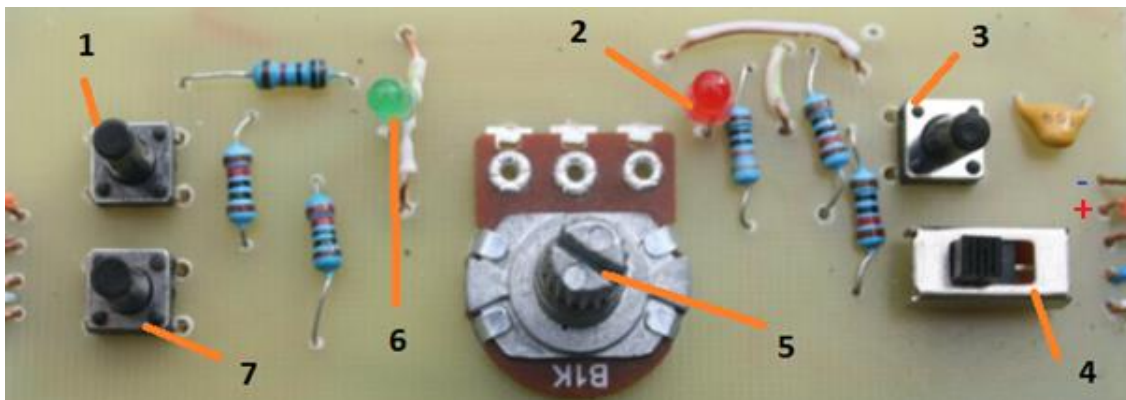
Leitud väärtuse alusel saab valida seadmele jahutusradiaatori, millega seade ei ületaks sümistori maksimaalset lubatavat siirde temperatuuri 125 °C. Sellest tulenevalt, et seadmes puudub aktiivjahutus, mis eemaldaks korpusest soojuste, on otstarbekas valida madalama väärtusega jahutusradiaator, mis hajutaks endas rohkem soojust. Samuti on võimalik piirata mikrokontrollerile programmeeritavas koodis pulsi laiuse väärtust, mis omakorda piirab sümistorile juhitud maksimaalset voolutugevust I_T . Madalama voolutugevuse

rakendamisel kütteelemendile saavutatakse küttekeha soovitud temperatuur protsessis pisut pikema ajaga, mis protsessi ei mõjuta.

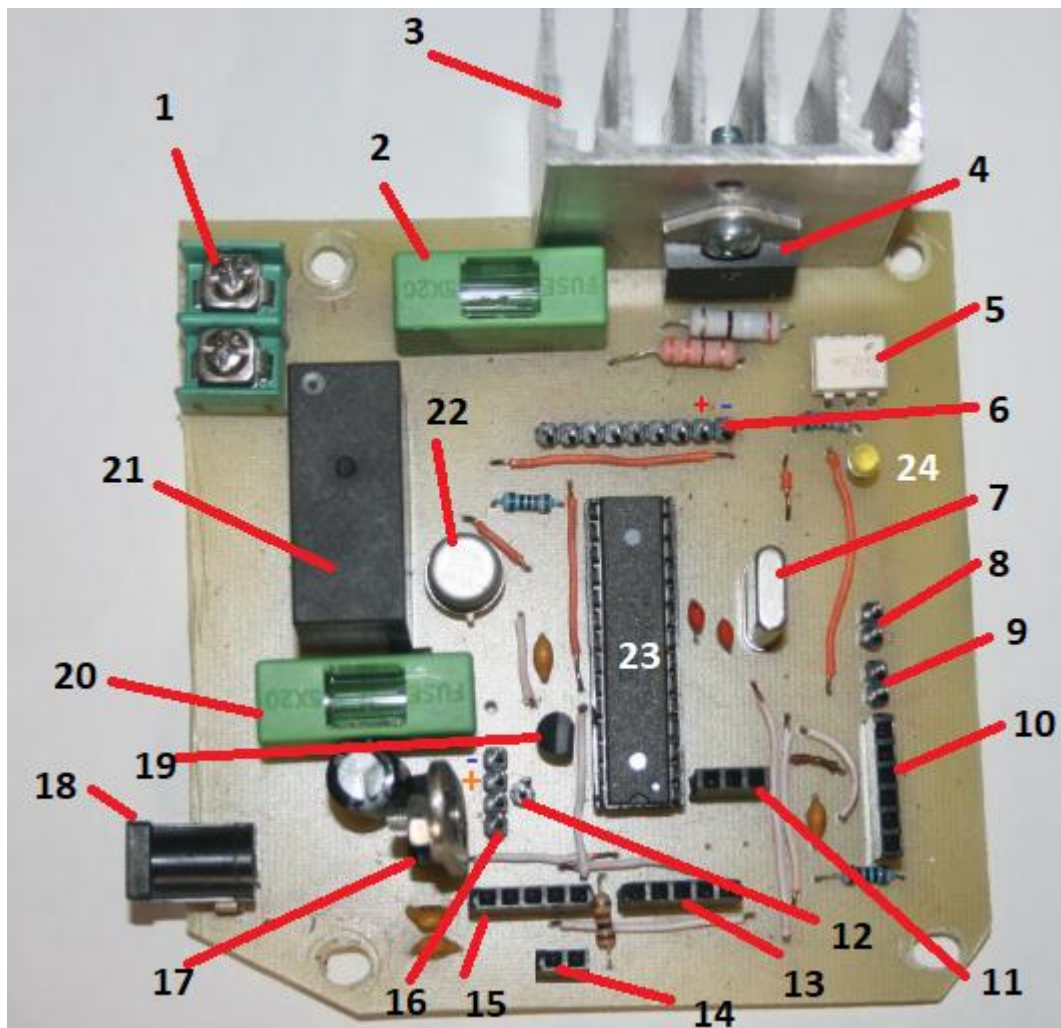
3.4. Seadme koostamine

Elektriskeemid ning trükkplaadi skeemid koostati *EAGLE* tarkvaraprogrammis, mille vabavara versioon võimaldab koostada trükkplaati mõõdus 80x100 mm. Trükkplaadi pindalale seatud piirang oli antud seadme projekteerimisel oluliseks kitsenduseks. Arvestada tuli sellega, et trükkplaadile paigutatakse nii vahelduvvoolu kui ka alalisvoolu elektroonika komponendid ning neid tuleb galvaaniliselt isoleerida. Lisades 1 ja 2 on toodud regulaatori- ja lülitipaneeli trükkplaadi skeemid.

Koostati kaks trükkplaadi versiooni, prototüüp ning valmisseade. Mõlema trükkplaadi söövitamiseks kasutati kuumutatud vee ja naatriumpersulfaadi segu. Vastavalt prototüübil ilmnenud vigadele tehti korrekture skeemis. Joonisel 3.6. on toodud lülitimooduli trükkplaadi joonis koos komponentidega. Joonisel 3.7. on toodud regulaatori trükkplaadi joonis kasutatud komponentidega.



Joonis 3.6. Lülitite moodul. 1 – Vahetajalüliti; 2 – inkubatsiooniaja LED; 3 – START lüliti; 4 – ekraanivahetuslüliti; 5 – potentsiomeeter; 6 – kütte indikaator; 7 – seadelüliti.



Joonis 3.7. Regulaatori trükkplaat. 1 – kruviklemm, kütteelemendi ja toite faasiühendused; 2 – sulavkaitse; 3 – jahutusradiaator; 4 – sümistor BTA41; 5 – optoisolaator MOC3041; 6 – (1 X 9) piikriba, lülitimooduli ühendus; 7 – kvartsotsillaator; 8 – (1 X 2) piikriba, 5 V ühendus; 9 – (1 X 2) piikriba, maanduse ühendus; 10 – (1 X 6) piikriba, programmaatoriga ühendamiseks; 11 – (1 X 3) piikriba, lähtetus (*reset*) regulaatorile; 12 – (1 X 1) piikriba, ühenduseta viik; 13 – (1 X 5) piikriba, reaktorivälise analoog-digitaalmuunduriga MAX6675 ühendamiseks; 14 – (1 X 2) piikriba, sumisti ühendus; 15 – (1 X 5) piikriba, reaktorisese analoog-digitaalmuunduriga MAX6675 ühendamiseks; 16 – (1 X 4) piikriba, $LCD\ I^2C$ mooduliga ühendamiseks; 17 – pingeregulaator LM7805; 18 – 9...12 V ühenduspesa, sisendpinge; 19 – temperatuuriandur LM35; 20 – sulavkaitse; 21 – rele; 22 – NPN transistor; 23 – mikrokontroller Atmega328-p; 24 – LED.

Prototüüpseadme korpuseks valiti õhuavadega harukarp mõõtudega 115x150x65 mm. Põhjuseks oli sobivus antud trükkplaadile ning lõppseadmel kasutataval korpusel olid sarnased mõõtmed. Üks eesmärke oli harukarbiga prototüübi katstamisel mõõta seadmes tekkivat soojust, sest kõikidel komponentidel on töötemperatuuri piirang. Kuna pooljuhtrelee töötamisel kõrgemal voolutugevusel tekib suur soojuse eraldumine, siis tuli

jälgida seadme sisetemperatuuri. Liiga kõrge temperatuuri korral tulnuks seadmesse integreerida ventilaator, mis puhub sooja õhu korpusest välja või puhub jahedat õhku korpusesse.

3.5. Korpuse projekteerimine

Korpuse detailijoonised ja koostejoonis on toodud lisas 5. Korpuse töötlemistehnoloogia valikuks kaaluti kahte erinevat lahendust: 3D printimine või *CNC* freesimine. *CNC* freesimise puhul osutus probleemiks sobiva paksusega toormaterjali leidmine, sest gabariitmõõtmed peavad toorikul olema vähemalt 125x115x60 mm. Samuti on freesimise ajal probleemiks materjali plastsus, mis võib lõikamisel tekitada tooriku läbipaindumist. Sellel põhjusel tekib valede mõõtmetega korpus. Kõvema materjali kasutamisel on *CNC* freesimisega lõiketöötlus lihtsasti teostatav *CAM* tarkvara abil genereeritud G- koodiga. Antud G- koodi on võimalik koostada kasutades puurimise ning tasku freesimise tsükleid. 3D Printimise puhul on tarvis kasutada suure ruumala printimisvõimalusega printerit. Keerulise konstruktsiooni tõttu eelistatigi freesimisele 3D printimist, mille tulemusel *ABS* materjalist korpus valmistati (joonis. 3.8.).



Joonis 3.8. 3D prinditud korpus

Korpuse projekteerimisel tuli lähtuda sellest, et seadet hakatakse kasutatama keskkonnas, kus vedelikud võivad sattuda seadmele. Korpuse avad tuli teha väikeste mõõtudega või kasutada avade sees kanalitega ehitust, kus vedelik ei saaks trükkplaadile ligi. Avad, mis projekteeriti sümistori jahutamiseks tuleb vedelike sissepääsu vältimiseks filtreerida, et vedelik ei satuks korpusesse ning õhk saaks sealt väljuda. Jahutuse parendamiseks on korpusesse jäetud ruumi ventilaatori kasutamiseks, mis seadmes ala-või ülerõhku tekitades soojust seadmest eemaldab. Ventilaatori kasutamise puuduseks on võõrkehade näiteks tolmu toomine seadmesse, mis võib seadme eluiga vähendada.

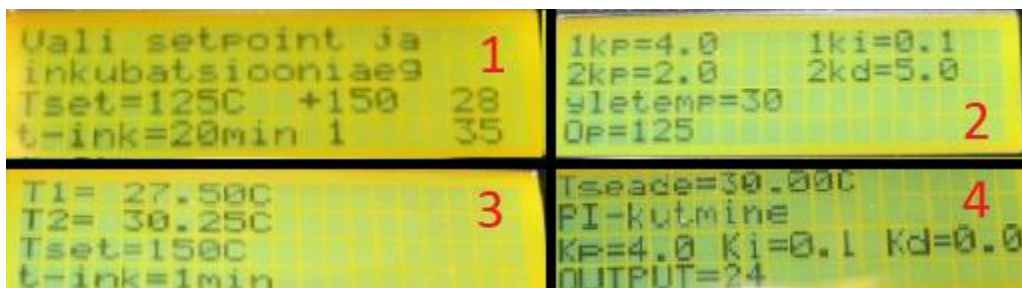
3.6. Mikrokontrolleri programmeerimine

Mikrokontrolleri programmeerimiseks kasutati Arduino *IDE* tarkvara ning programmeerimise lihtsustamiseks teiste autorite loodud vabavaralisi teeke. Regulaatorile juhttoime arvutamiseks kasutatakse Brett Beauregard'i loodud *PID* regulaatori algoritmi. Alamkood sisaldab põhilist *PID* arvutusvalemit ning parendusi, näiteks regulaatori väljundväärtuse piiramist 0...255, mis on pulsi laiuse vahemikuks. Programmkoodi ülekandmiseks mikrokontrollerile kasutati RS232 programmaatorit jadaliidesega sidestatuna läbi mikrokontrolleri esimese (*TX*) ja teise (*RX*) jadasiiniviikude. Programmkood on lisas 6.

Antud programmkoodi koostamisel kasutati kahendloogilisi tehteid ja võrdluseid, et lasta mikrokontrolleril hinnata, kas näiteks temperatuur on saavutatud, aja loendur on lõppenud jne. Üks olulisimaid kasutatud funktsioone antud programmkoodis on Boole'i loogika alusel ülesehitatud sündmuse juhtumise kontrollimine. Kahendloogikapõhisel koodiosal defineeritakse Boole'i operaator, millel on kaks väärtust: tõene või väär. Sündmuseid saab korrata vastavalt vajadusele [18].

Programmkoodi põhiraskus on erinevate parameetrite ja protsessiväärtuste kuvamine *LCD* ekraanil ning kindlustamine, et seal olevad andmed ja sümbolid oleksid õigesti paigutatud. Projekteeritud seadmepaneelil on neli erinevat parameetrite ekraanikuvamis seadistust (joonis 3.8.). Enne kütmise alustamist saab ekraanivahetaja lüliti (lisa 4.) abil muuta ekraanil kuvatavaid parameetreid. Punktidega 1, 2 on toodud kütmisevälised parameetrid ning kütmise käigus

vahetatavad kuvaseadistused punktidega 3, 4. Lisast 4 leiab seadme kasutusjuhendi, milles on kasutajaliides põhjalikult lahti kirjutatud.



Joonis 3.8. Erinevad ekraanikuvad. 1,2 – kütmissprotsessivälised kuva seadistused; 3, 4 – kütmissprotsessi kestel vahetatavad ekraanikuva seadistused

1. Seadetemperatuuri ja inkubatsiooniaja valimine.
2. Võimendustegurite ja muude kütteparameetrite väärtuste muutmine.
3. Protsessi kuvamine, kus näidatakse kütmise kestel hetketemperatuure, seadetemperatuuri ja inkubatsiooniaega.
4. Muude parameetrite kuvamine, kus antakse kütmise hetkel kasutajale informatsiooni korpuse sisese temperatuuri kohta. Kütmisel kasutatavate võimendustegurite informatsioon ning hetkel käimasolev töörežiim.

Seade on programmeeritud salvestama seadetemperatuuri, inkubatsiooniaega ning võimendustegureid oma püsimälusse. Selle eesmärgiks on kütmise parameetrite muutmine jäädavalt, näiteks mahtude suurenemisest või kütteelemendi vahetusest tulenevalt. Püsimälu eesmärgiks on ka igal seadme käivitamisel samade parameetrite uuesti sisestamise vältimine.

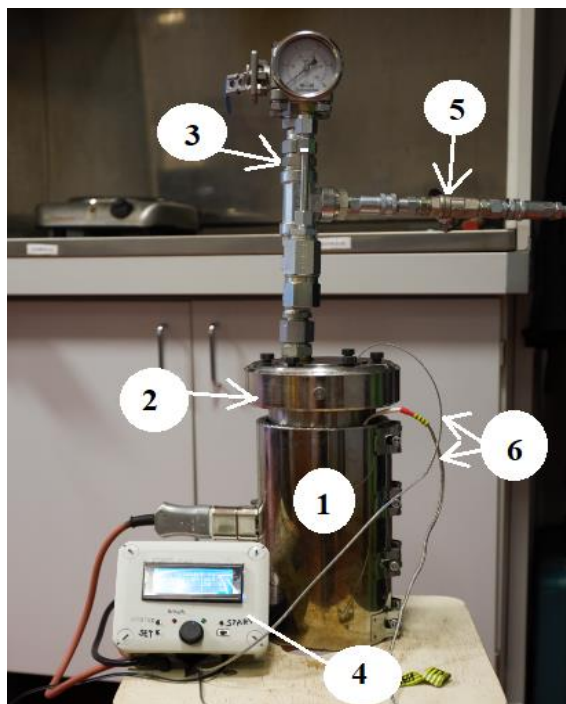
Vastavalt jaotises 2.1. loetelu pt. 8 esitatud nõudele rakendatakse programmisiseselt erinevaid ohutuslauseid, mis tagavad seadme ohutuse termopaaride valede näitude korral. Esialgselt oli kavandatud lisada kütteelemendi ohutuse tagamiseks termokaitse, mis rakenduks kindlal temperatuuril. Tulenevalt kütteelemendi ehitusest polnud elektroonikakomponenti võimalik paigaldada, seega lisati seadmele programmisisesed ohutuslauseid. Näiteks välise termopaari anduri näidul 235 °C lülitub seade välja. Vastavalt termopaari andmelehele väljastatakse temperatuurianduri näit 0 °C, kui puudub ühendus mikrokontrolleri ja analog-digitaalmuunduri MAX6675 vahel.

4. SEADME KATSETAMINE

4.1. Metoodika

Katsete eesmärgiks on regulaatori häälestamine seadetemperatuuril 150 °C. Katseliselt on leitud, et lämmastiklõhkamise seade termo-keemiline protsess annab parima tulemuse sellel temperatuuril. Regulaatori manuaalhäälestamise teostamiseks $PI+PD$ režiimidel muudetakse võimendustegurite väärtuseid igal katsel vastavalt protsessigraafiku muutustele. Pärast sobivamate tegurite leidmist katsetatakse võimendustegureid temperatuuridel: 125 °C ja 175 °C [1].

Regulaatori häälestamine viidi läbi EMÜ kütuste laboris. Igal katsel paigutati reaktorisse 0,1 kg saepuru ja 0,7 L destilleeritud vett (joonis 4.1.). Reaktor suleti hermeetiliselt kinnituspoltide abil ning gaasilise lämmastiku lisamisel suurendati rõhk süsteemis kuni $3 \cdot 10^6$ Pa. Reaktori kuumutamine toimus välise vöötükteelemendi abil, mis kattis reaktori silinderpinna. Pärast kuumutamist lasti reaktoril jahtuda, kuni sisetemperatuuri langemiseni 80 °C- ni. Ventiili avamisega tekitati süsteemis plahvatuslik rõhulangus, töödeldud biomass eemaldati reaktorist ning suunati järgnevasse töötlusprotsessi. Koostejoonis kuumutussüsteemist on toodud lisas 7.



Joonis 4.1. Biomassi eeltötlusreaktor. 1 – Kütteelement, 2 – reaktor, 3 – gaasitorustik, 4 – regulaatori prototüüp, 5 – gaasilise lämmastiku sisselaske toru, 6 – termopaarid.

Regulaatori häälestamiseks kasutati magistritöö käigus projekteeritud ja ehitatud regulaatori prototüüpi. Biomassi eeltötlussüsteemile paigaldati kaks K-tüüpi termopaari, millest üks andis regulaatorile sisendiks temperatuuri reaktori sees ning teine reaktori pinnal. Regulaatoril kasutati alajaotises 2.4. kirjeldatud algoritmi. Katsetel kasutati kahte küttekeha temperatuuri – 165 °C ja 180 °C, hindamaks kõrgema soojusliku inerts mõju süsteemile. Sisetemperatuuri 150 °C hoiti katsete käigus 20 minutilise inkubatsiooniaja vältel.

4.2. Katsete tulemused

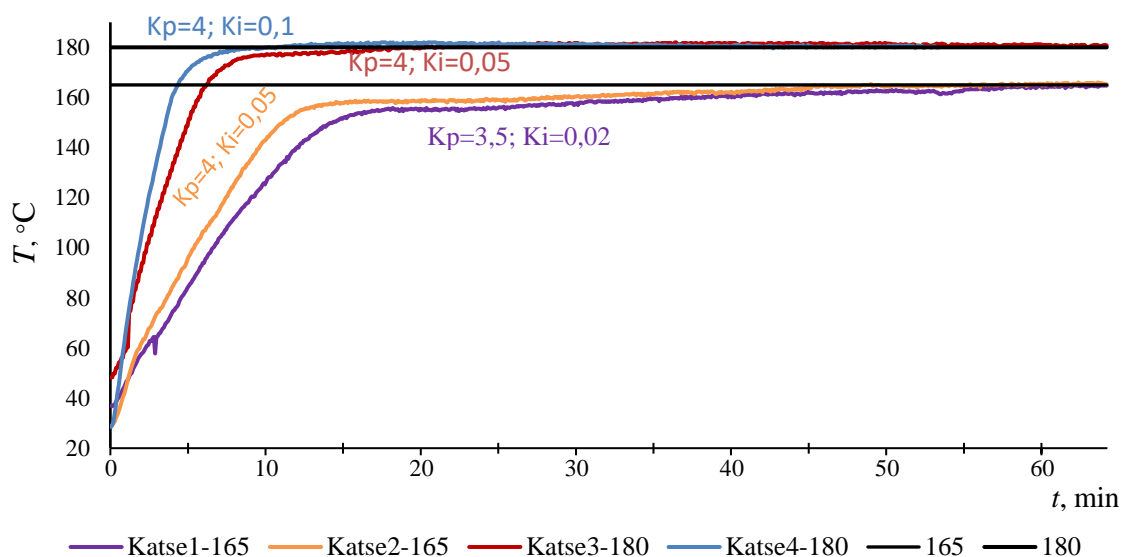
Enne regulaatori häälestamist katsetati avatud reaktoriga ja ainult veega, et leida ligikaudsed võimendustegurid. Häälestamist alustati ligikaudsete teguritega ning regulaatori soovitud tulemusele häälestamiseks temperatuuril 150 °C kulus neli katset. Antud katsete tulemused on toodud *PI* režiimil töötades joonisel 4.2. ja *PD* režiimil töötades joonisel 4.3.

Esmalt keskenduti *PI* režiimile protsessi alguses, kus temperatuuride ette andmine regulaatorile toimus küttekeha temperatuuri abil. Katseid alustati ülekaalustatud proportsionaalse võimendusteguriga 3,5, et jälgida, kas süsteemis tekib ülereguleerimist

ning madala integreeriva lüli võimendusteguriga, mis samas väldiks ülereguleerimist. Katsete parameetrid on toodud tabelis 4.1.

Tabel 4.1. Katsete parameetrite väärtused enne seadetemperatuuri saavutamist reaktori-siseselt

Katse	katse 1	katse 2	katse 3	katse 4
Küttekeha seadetemperatuur	165 °C	165 °C	180 °C	180 °C
Proportsionaalne võimendustegur (K_p) enne seadetemperatuuri saavutamist reaktoris	3,5	4	4	4
Integreeriva toime võimendus tegur (K_i) enne seadetemperatuuri saavutamist reaktoris	0,02	0,02	0,05	0,1
Küttekeha temperatuuri ülereguleerimine	1 °C	1 °C	2 °C	2 °C
Välise temperatuuri saavutamise aeg	62 min	45 min	18 min	11 min



Joonis 4.2. Küttekeha temperatuurimuutus ajas katsetel 1-4.

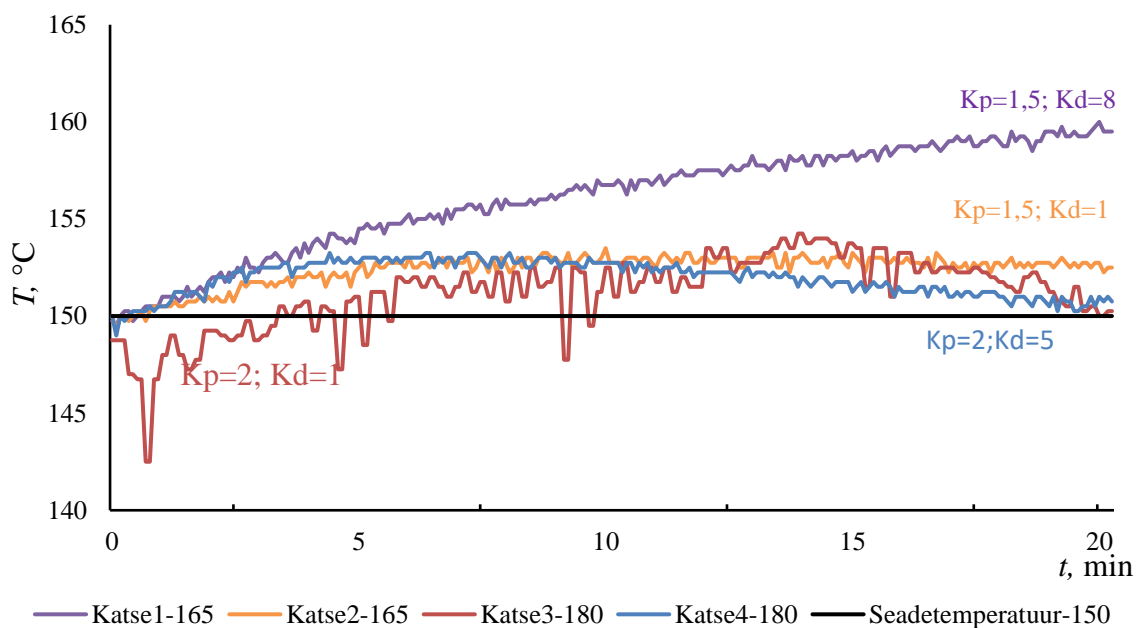
165 °C Katsetel ilmnes, et küttekeha saavutas seadetemperatuuri alles 62 ja 45 minuti pärast. Järgnevatel katsetel suurendati seadetemperatuuri ja võimendustegureid kuni väärtusteni, mille puhul kasvas ülereguleerimine, kuid seadetemperatuuri saavutamine langes 11- le minutile. Maksimaalne ülereguleerimine 165 °C temperatuuril oli 1 °C ja temperatuuril 180 °C juures 2 °C.

Vahetult pärast seadetemperatuuri 150 °C saavutamist reaktoris lülitati regulaator ümber *PI* režiimist *PD* režiimi, mille eesmärgiks oli diferentsiaallüli toimest tulenevate lühikeste kütteelemendi sisselülitamiste impulsside abil seadetemperatuuri säilitamine. Esmalt võrreldi kahe katse käigus diferentseeriva lüli võimendustegurite mõju inkubatsiooniaja

kestel. Võrdluse all oli ülekaalustatud diferentseeriv võimendustegur $K_D = 8$ ja teisel katsel $K_D = 1$. Ülekaalustatud diferentseeriva võimendusteguri puhul tekkis $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ülereguleerimine, mis tähendab, et diferentseeriv lüli olenemata seadetemperatuuri väärtuse piirangust ülereguleeris temperatuuri sobimatult. $K_D = 1$ puhul stabiliseerus temperatuur sobivalt 154°C juures. Katsete parameetrid on tabelis 4.2.

Tabel 4.2. Katsete parameetrite väärtused inkubatsiooniaja kestel

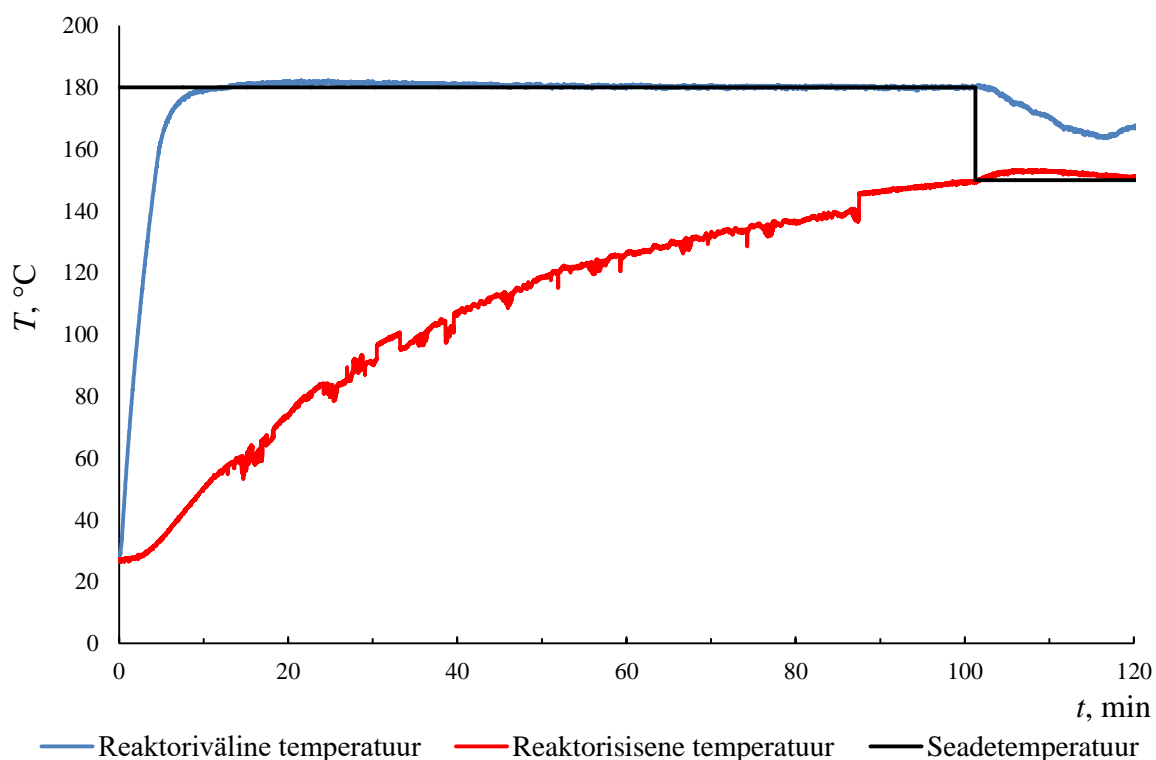
Katse	Katse 1	Katse 2	Katse 3	Katse 4
Reaktori sisene seadetemperatuur	150	150	150	150
Reaktori väline seadetemperatuur	165	165	180	180
Proportsionaalne võimendustegur (K_p) pärast seadetemperatuuri saavutamist	1,5	1,5	2	2
Diferentsiaalne võimendustegur (K_d) pärast seadetemperatuuri saavutamist	8	1	1	5
Reaktorisisese temperatuuri ülereguleerimine	$10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$4,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$3,25\text{ }^{\circ}\text{C}$



Joonis 4.3. Katsete 1-4 reaktorisiseste temperatuuride muutus ajas.

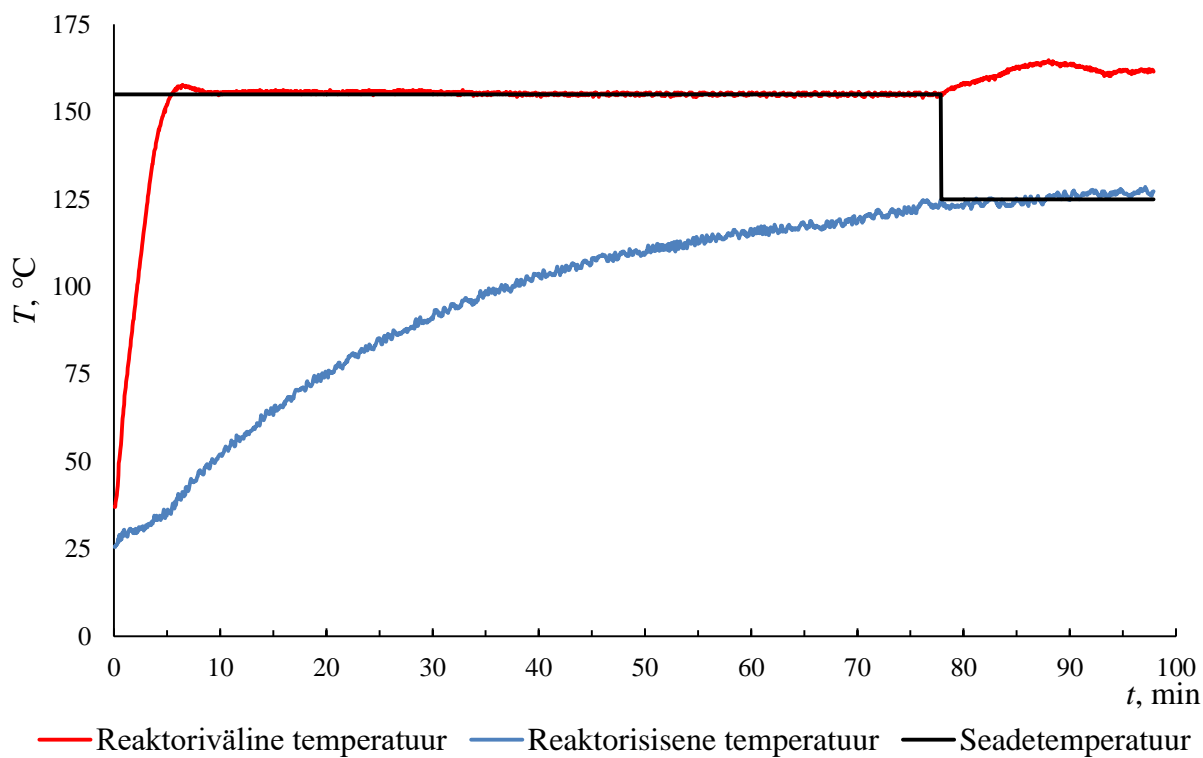
Kolmandal katsel tekkinud siirdegraafik oli hüppeline ja ebastabiilne, mis tulenes katse kestel termopaari isolatsiooni kulumisest. Kasutati mittesobivat isolatsiooni, mis ei olnud piisava kuumakindlusega. Isolatsiooni puudumise tõttu sattus termopaari mõõteotsik roostevaba terasest pinnaga kokku ning tulemused olid selle tõttu moonutatud. Küttekeha kõrgema soojusliku inerts mõju süsteemile oli küttekeha temperatuuride $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $180\text{ }^{\circ}\text{C}$

võrdlusele olematu, sest küttekeha jahtub kiiresti. Kiire jahtumine on põhjustatud küttekeha ehitusest, sest see annab palju soojust väliskeskkonda. Sõltumata eelnevast suurendati K_D väärtust 5-ni, et temperatuur langema saada. Võimendustegurite muutmise tulemuseks oli neljandal katsel saadud joonis 4.4. mis näitab, kuidas temperatuur hakkab inkubatsiooniaja lõpus langema.

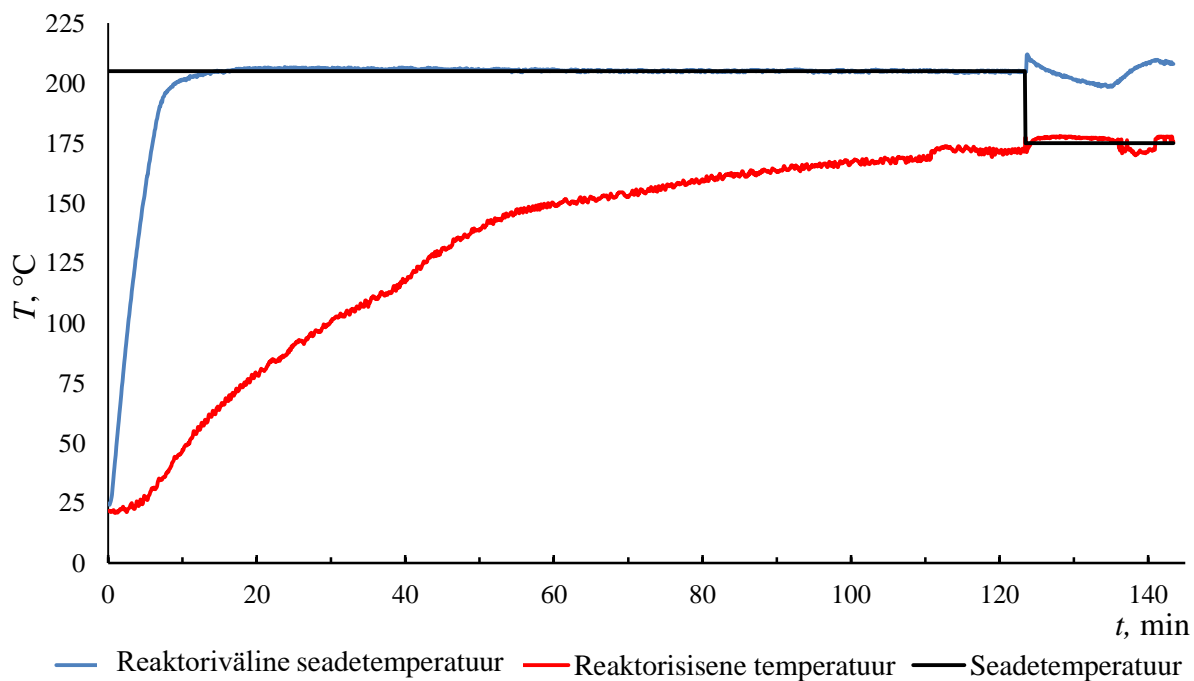


Joonis 4.4. Neljanda katsetulemused PI+PD režiimil sättetemperatuuril 150 °C.

Neljanda katse tulemused tõid kaasa 3.25 °C ülereguleerimise inkubatsiooniaja kestel, mis oli põhjustatud süsteemi soojuslikust inertsist. Kuigi ülereguleerimine pole kadunud, siis viie kraadi piires on see antud süsteemis lubatud. Pärast sobivate võimendustegurite leidmist rakendati antud tegureid temperatuuridel 125 °C ja 175 °C, mille graafikud on toodud joonistel 4.5. ja 4.6.



Joonis 4.5. Katse temperatuuril 125 °C.



Joonis 4.6. Katse temperatuuril 175 °C.

Saadud graafikute põhjal võib järeldada, et leitud võimendustegurid sobivad antud süsteemile. Lõplikeks võimendustegurite väärtusteks on kütmise alguses PI režiimil küttekeha temperatuuri järgi $K_p = 4$; $K_I = 0,1$; $K_D = 0$ ning PD režiimil sisetemperatuuri alusel $K_p = 2$; $K_I = 0$; $K_D = 5$.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös projekteeriti ja ehitati temperatuuriregulaator biomassi kuumutussüsteemile. Ehitatud regulaator on negatiivse tagasisidega pidevatoimeline kaskaadregulaator. Regulaatori tagasiside moodustavad kaks kuumutussüsteemi paigaldatavat temperatuuriandurit. Arvestades andurite hinda, stabiilsust ja temperatuurivahemikku valiti süsteemi K-tüüpi termopaarid. Kaskaadregulaatori põhikontuuriks on küttekeha temperatuur. Alluvkontuuriks on temperatuur reaktori sees, mille andur on sisestatud reaktori kaanel asuvasse pesasse. Süsteemile rakendatakse kaskaadjuhtimist, kuna temperatuur reaktori sees kasvab aeglaselt, tulenevalt biomassi ja vee segu madalast konvektiivsest soojusjuhtivustegurist.

Regulaatori tüübiks eelistati pidevatoimelist regulaatorit, sest diskreetse regulaatoriga peab arvestama hüstereesivea või tundetusalaga. Pidevatoimeline regulaator koosneb proportsionaalsest, integraalsest ning diferentsiaalsest lülist. Lülisid võib regulaatoris kasutada ka üksikult või kombineeritult. Regulaatoris arvutatakse esmalt hetkeviga, millega iga lüli teostab arvutustehte ning rakendab summeeritud juhttoime süsteemi täiturile. Proportsionaalne lüli rakendab proportsionaalselt võrdelise juhttoime. Integreeriv lüli integreerib hetkeviga iga ajaintervalli järel, kuni see elimineeritakse. Diferentseeriva lüli valemis leitakse hetkeveast tuletis. Diferentseeriv lüli rakendab lühikese juhttoime impulsi. Antud seadmes leitud summeeritud kolme lüli juhttoime rakendati süsteemi täiturile ehk optoisolaatoriga ühendatud sümistorile. Sümistori paisule voolu tüürimisel toimub türistori poolt voolu juhtimine, kuni pinge väärtus läbib nulliristumise. Selle tulemusel toimub seadme hetkvõimsuse reguleerimine.

Regulaatorile koostati algoritm, mille alusel köetakse põhikontuur soojemaks, kui on seadetemperatuur reaktori sees. Seda tehakse *PI*- töörežiimis. Sättetemperatuuri saavutamisel reaktoris toimub regulaatori seadistuse muutmine *PD*- töörežiimile. Ühtlasi alustatakse inkubatsiooniaja loendamist. Pärast loenduri täitumist lõpetatakse kütmine kommuteerides lahti relee ühenduskontaktid.

Regulaatorile projekteeriti ja 3D prinditi *ABS* materjalist korpus. Korpus projekteeriti vastavalt regulaatori trükkplaadi mõõtudele ja seadmes kasutatavate komponentide

suurusele. Korpus koosneb kahest komponendist: alusest ja kaanest. Kaane sisse on paigutatud seadme vedelkristallekraan ning koostatud lülitimoodul. *LCD*-ks valiti 4x20 sümbolite arvuga jadaliidese kaudu ühendatav ekraan.

Katselises osas teostati regulaatori häälestus, kus neljal samal temperatuuril tehtud katsel muudeti võimendustegurite väärtuseid vastavalt protsessigraafiku muutustele. Pärast sobivate võimendustegurite leidmist teostati katsed madalamal ning kõrgemal temperatuuril. Maksimaalne ülereguleerimine ei ületanud 3,5 °C. Lõplikult häälestatud seade koosneb kütmise alguses võimendusteguritest $K_p = 4$; $K_I = 0,1$; $K_D = 0$ ning pärast seadetemperatuuri saavutamist jätkatakse parameetritega $K_p = 2$; $K_I = 0$; $K_D = 5$.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Rooni. V.** (2015) Lignotsellululoosse toorme lagundamine plahvatusliku rõhumuutuse meetodil, Tartu, 2015.
2. **Cengel. Y.** (2003) Heat transfer: A practical approach, vol. 2, Boston: McGraw-Hill, 874 lk.
3. Department of Physics and Astronomy. Hyper physics. [veebileht].
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/heatra.html>. (25.05.2018)
4. **Kulu. P.** (2015) Mehaanikainseneri käsiraamat, TTÜ kirjastus, Tallinn, 492 lk.
5. **Aström. K.J: Hägglund. T.** (2006) ADVANCED PID CONTROL, ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 460 lk.
6. **Franklin. G.F. Powell. J.D. Emami-Naeini** (2015) Feedback control of dynamic systems, vol 7, Pearson, 863 lk.
7. **Ang, K.H. Chong, G.C.Y. Li, Y.** (2005) PID control system analysis, design, and technology, IEEE Trans Control Systems Tech.
8. Opticontrols. A tutorial on cascade control. [veebileht]
<http://blog.opticontrols.com/archives/105> (25.05.2018)
9. **Webster. J. G.** (1999) The measurement, instrumentation and sensors: CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 2502 lk.
10. Phillips Semoconductors, Power Semiconductor Applications. [andmeleht]
<http://www.soloelectronica.net/triac/APPCHP6.PDF> (25.05.2018)
11. West-CS, KS94 Industrial & process controller [andmeleht] <https://www.west-cs.com/assets/Datasheets/KS-94-Datasheet.pdf> (25.05.2018)
12. Watlow. Watlow EZ-ZONE PM controller [andmeleht]
<https://www.watlowdistributor.com/HTML/Watlow-EZ-Zone-PM-spec.pdf> (25.05.2018)
13. rKc Instrument Inc. Multi-Loop Digital Temperature Controller MA900 [andmeleht]
http://www.flw.com/rkc/pdf/ma900_03e.pdf (25.05.2018)
14. Electronics-tutorials. Triac tutorial [veebileht] <https://www.electronics-tutorials.ws/power/triac.html>. (25.05.2018)
15. Fairchild Semiconductor. MOC302x dokumentatsioon [andmeleht].
<http://www.farnell.com/datasheets/97984.pdf> (25.05.2018)

16. Vishay. 4N25 andmeleht [andmeleht] <https://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf> (25.05.2018)
17. Fairchild Semiconductor. MOC306x dokumentatsioon [andmeleht] <https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/277931FSC.pdf> (25.05.2018)
18. **Sell. R. Leini. M. Salong. P.** (2010) Mikrokontrollerid ja praktiline robotika, TTÜ Kirjastus Tallinn, 221 lk.
19. Atmel. Atmega 328/P seadme dokumentatsioon [andmeleht] http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf (25.05.2018)
20. STMicroelectronics. BTA 41 dokumentatsioon [andmeleht] <http://www.st.com/resource/en/datasheet/bta40.pdf>. (25.05.2018)
21. MAXIM. "Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to digital Converter MAX6675 [andmeleht] <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MAX6675.pdf> (25.05.2018)
22. P. Vis, Jahutusradiaatori arvutus [veebileht] https://www.petervis.com/electronics/Voltage_Regulator_Heatsink/Heatsink_for_TO-220_Voltage_Regulator.html (25.05.2018)

LISAD